Proceedings of a Symposium, Bucharest, 17-21 May 1965

Vol. I

hondestructive testing in nuclear technology



INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 1965

place après usage

SECTION FRANÇAISE

NON-DESTRUCTIVE TESTING IN NUCLEAR TECHNOLOGY

AFGHANISTAN ALBANIA ALGERIA ARGENTINA AUSTRALIA AUSTRIA BELGIUM BOLIVIA BRAZIL BULGARIA BURMA BYELORUSSIAN SOVIET SOCIALIST REPUBLIC CAMBODIA CAMEROON CANADA CEYLON CHILE CHINA COLOMBIA CONGO, DEMOCRATIC REPUBLIC OF COSTA RICA CUBA CYPRUS CZECHOSLOVAK SOCIALIST REPUBLIC DENMARK DOMINICAN REPUBLIC ECUADOR EL SALVADOR ETHIOPIA FINLAND FRANCE

FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY GABON GHANA GREECE **GUATEMALA** HAITI HOLY SEE HONDURAS HUNGARY ICELAND INDIA INDONESIA IRAN IRAQ ISRAEL ITALY IVORY COAST JAPAN KENYA REPUBLIC OF KOREA KUWAIT LEBANON LIBERIA LIBYA LUXEMBOURG MADAGASCAR MALI MEXICO MONACO MOROCCO NETHERLANDS NEW ZEALAND NICARAGUA

NIGERIA NORWAY PAKISTAN PARAGUAY PERU PHILIPPINES POLAND PORTUGAL ROMANIA SAUDI ARABIA SENEGAL SOUTH AFRICA SPAIN SUDAN SWEDEN SWITZERLAND SYRIÁ THAILAND TUNISIA TURKEY UKRAINIAN SOVIET SOCIALIST REPUBLIC UNION OF SOVIET SOCIALIST REPUBLICS UNITED ARAB REPUBLIC UNITED KINGDOM OF GREAT BRITAIN AND NORTHERN IRELAND UNITED STATES OF AMERICA URUGUAY VENEZUELA VIET-NAM YUGOSLAVIA

The Agency's Statute was approved on 23 October 1956 by the Conference on the Statute of the IAEA held at United Nations Headquarters, New York; it entered into force on 29 July 1957. The Headquarters of the Agency are situated in Vienna. Its principal objective is "to accelerate and enlarge the contribution of atomic energy to peace, health and prosperity throughout the world".

Printed by the IAEA in Austria September 1965

PROCEEDINGS SERIES

NON-DESTRUCTIVE TESTING IN NUCLEAR TECHNOLOGY

PROCEEDINGS OF A SYMPOSIUM ON NON-DESTRUCTIVE TESTING IN NUCLEAR TECHNOLOGY HELD BY THE INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY IN BUCHAREST, 17-21 MAY 1965

In two volumes

VOL.I

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY VIENNA, 1965

Symposium on Non-Destructive Testing in Nuclear Technology, Bucharest, 17-21 May 1965.
Proceedings ... held by the International Atomic
Energy Agency ... Vienna, the Agency, 1965.
2 vols. (IAEA Proceedings series)

620.179.1(063)"1965" (063)620.179.1"1965" 621.039:620.179.1

NON-DESTRUCTIVE TESTING IN NUCLEAR TECHNOLOGY, IAEA, VIENNA, 1965 STI/PUB/105

FOREWORD

The Symposium on Non-Destructive Testing in Nuclear Technology was convened by the International Atomic Energy Agency and held, at the invitation of the Romanian People's Republic, in Bucharest from 17 to 21 May 1965.

This was the first large IAEA symposium on this topic and was arranged with the help of the Romanian Institute of Atomic Physics. Over 100 participants from 20 countries and two international organizations presented 46 papers.

The development of non-destructive testing techniques has increased considerably in recent years, particularly in the nuclear field. Nondestructive testing methods such as ultrasonic and radiographic testing are proving increasingly useful for ensuring that reactor materials and components will stand up to prolonged and rigorous use. Such methods are used to test for flaws, to check dimensions such as tube-wall thickness, and to determine the location and distribution of uranium fuel in a fuel element.

Speakers stressed that these methods were invaluable for providing extensive and detailed data on the physical structure and condition of materials and the effects of fabrication processes. Among aspects of non-destructive testing that were discussed were the use of automation; assistance at the design stage for attaining higher strength-to-weight ratios; the testing of welds in reactor containment vessels; and the testing of sintered materials.

The important information presented at the Symposium and the extensive discussions among scientists demonstrated the desire to accelerate solutions to various problems connected with non-destructive testing techniques.

The IAEA wishes to express gratitude to the Romanian Government and the Romanian Institute of Atomic Physics for their generous hospitality and co-operation.

EDITORIAL NOTE

The papers and discussions incorporated in the proceedings published by the International Atomic Energy Agency are edited by the Agency's editorial staff to the extent considered necessary for the reader's assistance. The views expressed and the general style adopted remain, however, the responsibility of the named authors or participants.

For the sake of speed of publication the present Proceedings have been printed by composition typing and photo-offset lithography. Within the limitations imposed by this method, every effort has been made to maintain a high editorial standard; in particular, the units and symbols employed are to the fullest practicable extent those standardized or recommended by the competent international scientific bodies.

The affiliations of authors are those given at the time of nomination. The use in these Proceedings of particular designations of countries or territories does not imply any judgement by the Agency as to the legal status of such countries or territories, of their authorities and institutions or of the delimitation of their boundaries.

The mention of specific companies or of their products or brand-names does not imply any endorsement or recommendation on the part of the International Atomic Energy Agency.

CONTENTS OF VOL.I

SESSION I	Ľ
-----------	---

Eddy-current testing of finned fuel cladding (SM 63/2)	3
A.J. Otter (Canada)	
Microradiographic fuel investigation in this layers (SM 63/47)	17
R. Neider and P. de Meester (Belgium)	
Détermination de la teneur en uranium dans les alliages a base	
d'aluminium (SM 63/34)	35
J. Gérard et L. Van Hove (Belgique)	

SESSION II

Limitations of Ir ¹⁹² as a radiographic source for the control of	
reactor pressure-vessels (SM 63/22) ,	61
D. Horvat (Yugoslavia)	
Utilisation de la radiographie a basse tension pour la détection de	
défauts dans les tubes a parois minces en poudre d'aluminium	
fritée (SM 63/24)	75
P. Bonnet et J. Jansen (EURATOM)	
Contrôles non destructifs de barreaux combustibles enrichis au	
plutonium (SM 63/33)	101
P. Libotte, H. Inniger et J. M. Leblanc (Belgique)	
Некоторые возможности метода вихревых токов для многопараметров	ого
контроля элементов конструкции (SM-63/46)	115
В.Г.Вяхорев, В.Г.Герасимов, В.П.Денискин, Л.И.Трахтенберг и	
Ю.М.Шкарлет (СССР)	

SESSION III

•

Проблемы дефектоскопического контроля строительных материалов	
реактора первой чехословацкой атомной электростанции	
(SM-63/11)	139
Р.Филипп (ЧССР)	
Non-destructive testing in reactor pressure-vessel fabrication	
(SM 63/31)	151
W. J. McGonnagle (United States of America)	
Méthodes de contrôle utilisées au département de métallurgie pour	
les éléments de structure et les éléments combustibles	
(SM 63/5)	167
Marie-Thérèse Destribats, C. Allain, A. Prot et P. Thomé	
(France)	
Non-destructive testing methods applied to multi-finned SAP tubing	
for nuclear-fuel elements (SM 63/10)	191
S.A. Lund and P. Knudsen (Denmark)	

Application des différentes méthodes d'essais non destructifs aux	
éléments combustibles du type orgel (SM 63/23)	205
P. Bonnet, J. Jansen et al. (EURATOM)	
Дефектоскопия тонкостенных труб (SM-63/45)	233
В.В.Горский, В.М.Захаров, Г.А.Никитин, В.К.Попов,	
В.Т.Пронякин и Б.С. Ходулев (СССР)	

SESSION IV

Quality selection of Zircaloy-2 canning tubes by ultrasonic testing	
on small defects (SM 63/1)	259
A. Van Der Linde and J.A. de Raad (Netherlands)	
Contrôle automatique d'éléments colaminés (SM 63/4)	275
Marie-Thérèse Destribats et J. Dory (France)	
Ultrasonic detection of longitudinal defects in thin-wall cladding	
tubes (SM 63/13)	285
U. Nyström (Sweden)	•
Contrôle industriel par ultrasons des gaines en acier inoxydable du	
reacteur EL4 (SM 63/6)	303
A.C. Prot, H.E. Foulquier et J.P. Peyrot (France)	
Automation of tube-thickness measurements using ultrasonics	
(SM 63/37)	321
F.H. Wells, C.N. Davey and C. Sharpe (United Kingdom)	
New methods and facilities for the measurement of physical	
properties of reactor components and irradiated materials	
(SM 63/20a)	331
F. Förster and P. Müller (Federal Republic of Germany)	
New instruments and principles for the dimensional measurement	
and measurement of spacing of reactor components (SM $63/20b$)	367
P. Müller (Federal Republic of Germany)	
Automatic inspection of nuclear-reactor tubes during production	
and processing, using eddy-current methods (SM 63/19)	371
F. Förster and P. Müller (Federal Republic of Germany)	

Chairmen of Sessions and Secretariat of the Symposium

393

Session I

ı

۵

.

EDDY-CURRENT TESTING OF FINNED FUEL CLADDING

A. J. OTTER ATOMIC ENERGY OF CANADA, LIMITED, CHALK RIVER, ONTARIO, CANADA

(Presented by A.D. McEACHERN)

Abstract — Résumé — Аннотация — Resumen

EDDY-CURRENT TESTING OF FINNED FUEL CLADDING. Eddy-current methods of testing reactor-fuel components are well established. The literature, however, mainly describes tests which are applied to simple geometries such as cylindrical rods or tubes. Recent AECL fuel designs have called for cladding with heat transfer or locating fins along the length of the fuel. This paper describes the application of eddy-current techniques to three such designs. The function and geometry of the fins must be considered in the selection of the optimum test parameters and the most suitable test coil geometry. Thus, the presence of fins may limit or restrict the test but they will not prevent a successful test. Where the fin geometry is complex eddy currents may well be the most suitable of the non-destructive methods which can be used for flaw detection.

The thickness of aluminium cladding over a uranium core is measured with a small probe coil placed between the fins and shielded from them. Two flaw detection tests are described, one on sintered aluminium product (SAP) tubing using an internal bobbin coil and the other on an aluminium-clad uranium-aluminium alloy rod with an external encircling coil.

The instrumentation described is relatively simple. A small portable instrument was designed for the cladding thickness measurement. For flaw detection a standard oscilloscope with a plug-in carrier-amplifier module provides a means of sensing and displaying the test coil impedance variations. This equipment, although it does not permit sophisticated methods of eliminating unwanted noise, is adequate for a variety of testing applications and has been specified for routine fuel testing on a production basis.

CONTRÔLE DES GAINES A AILETTES AU MOYEN DES COURANTS DE FOUCAULT. Les méthodes de contrôle des éléments combustibles au moyen des courants de Foucault ont déjà fait leurs preuves. Mais on trouve surtout dans la documentation pertinente des comptes rendus d'essais appliqués à des géométries très simples, constituées notamment par des barreaux ou des tubes cylindriques. La mise au point de combustibles nouveaux par l'AECL a entraîné la réalisation de gaines munies, sur toute leur longueur, d'ailettes pour le transfert de chaleur ou le positionnement. Le mémoire décrit l'application de la méthode des courants de Foucault à trois de ces modèles de gaines. Il faut tenir compte de l'objet et de la géométrie des ailettes dans le choix des paramètres optimaux d'essai et de la géométrie la plus appropriée pour la bobine. La présence des ailettes peut donc limiter ou restreindre le contrôle, mais non empêcher un contrôle valable. Lorsque la géométrie non destructif dont on dispose pour déceler les défauts.

Pour mesurer l'épaisseur de la gaine d'aluminium qui contient l'uranium, on utilise une petite bobine placée entre les ailettes et protégée par un écran. L'auteur décrit deux procédés de détection des défauts: le premier, appliqué dans le cas d'un tube en poudre d'aluminium frittée, fait intervenir une bobine à l'intérieur du tube; le deuxième, appliqué dans le cas d'un barreau en alliage uranium-aluminium sous gaine d'aluminium, met en jeu une bobine qui encercle le barreau.

Les instruments décrits sont relativement simples. Un petit appareil portatif est utilisé pour mesurer l'épaisseur de la gaine. Pour la détection des défauts un oscilloscope normal, muni d'un relais amplificateur du courant porteur, permet de détecter et d'amplifier les variations d'impédance de la bobine. Bien qu'il ne permette pas d'appliquer des méthodes raffinées d'élimination du bruit parasite, ce matériel convient pour toute une gamme de contrôles; il a été approuvé pour le contrôle courant des éléments combustibles en cours de fabrication.

ПРОВЕРКА РЕБРИСТОГО ПОКРЫТИЯ ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА С ПОМОЩЬЮ ВИХ-РЕВЫХ ТОКОВ. Методы проверки компонентов реакторного топлива с помощью вихревых

3

токов хорошо разработаны. В литературе, однако, в основном описываются испытания, которые проводятся в отношении простых геометрических форм, например цилиндрических стержней или труб. В последних конструкциях топливных элементов, созданных в КАЭ, применяется покрытие с переносом тепла или с ребристой поверхностью. Сообщается, как метод вихревых токов применяется в отношении трех таких конструкций. Функцию и геометрию ребер необходимо рассматривать при выборе оптимальных параметров испытания и наиболее подходящей геометрии испытательной катушки. Таким образом, наличие ребер может ограничить проведение испытаний, но не успех проведения проверки. При сложной геометрии ребер вихревые токи, по-видимому, лучше всего подходят в качестве методов проверки без разрушения материала, которые можно использовать для обнаружения дефектов.

Толщина алюминиевой оболочки уранового стержня измеряется с помощью небольшой зондовой катушки, помещенной между ребрами и защищенной от них. Описываются испытания с целью обнаружения дефектов. Одно касается труб из спеченного алюминиевого продукта с использованием внутренней катушки, а другое – стержня из сплава уран-алюминий и с покрытием из алюминия с помощью внешней катушки.

Описываемые приборы сравнительно просты. Для измерения толщины покрытия сконструирован небольшой портативный прибор. При обнаружении 'дефектов стандартный осциллоскоп с модулем включения носителя-усилителя предоставляет возможность прочувствовать и определить изменения сопротивления испытательной катушки. Хотя такое оборудование не дает возможности применить усложненные методы для устранения нежелательного шума, оно пригодно для различных проверок и предназначено для обычного испытания топливных элементов в производственных масштабах.

EMPLEO DE CORRIENTES DE FOUCAULT PARA ENSAYAR REVESTIMIENTOS CON ALETAS. Las corrientes de Foucault suelen emplearse con frecuencia para ensayar componentes de combusitbles nucleares. Sinembargo, la literature existente describe sobre todo ensayos aplicados a formas geométricas simples, por ejemplo barras o tubos cilíndricos. En los últimos tiempos, los diseños de combusitbles de la Atomic Energy of Canada Limited vienen especificando revestimientos con aletas longitudinales para la transmisión de calor o localización del elemento. La presente memoria describe la aplicación de la técnica de corrientes de Foucault a tres de esos diseños. Al seleccionar los parámetros óptimos de ensayo y la forma más adecuada de la bobina de prueba, es necesario considerar la función y la geometría de las aletas. Así, por ejemplo, la presencia de estas últimas puede limitar el ensayo, pero no impide que se obtengan resultados satisfactorios. Cuando la forma de las aletas es compleja, el método de las corrientes de Foucault es quizá el más adecuado de los procedimientos no destructivos que cabe usar para la detección de fallas.

El espesor del revestimiento de aluminio sobre un alma de uranio se mide con una pequeña bobina exploradora colocada entre las aletas y blindada respecto de estas últimas. Se describen en la memoria dos ensayos de detección de fallas: uno en tubos de producto de aluminio sinterizado (SAP), usando una bobina interna; el otro en una barra de aleación uranio-aluminio y revestimiento de aluminio, empleando una bobina anular exterior.

El equipo descrito es relativamente simple. Se diseñó un pequeñó instrumento portátil para medir el espesor del revestimiento. En la detección de fallas, se recurre a un osciloscopio normal con módulo portadoramplificador enchufable, para detectar y poner de manifiesto las variaciones de impedancia de la bobina de prueba. Aunque no permite el uso de métodos perfeccionados para eliminar los ruidos indeseables, este equipo sirve para diversas aplicaciones y suele utilizarse para proceder al ensayo sistemático de combustibles, durante la producción de estos últimos.

INTRODUCTION

The theoretical equations used to determine operating parameters in eddy-current testing are based on simple geometries [1] and cannot be expected to apply to finned components. This is not a serious limitation as the optimum frequency and test speed must often be determined experimentally.

The function and size of the fins are important parameters in the design of an eddy-current method for testing a finned component. For example, some flaws may be unimportant if they occur in the fins but cause for re-



Fig. 1

Element details

jection if they are in the cladding. In some cases it may be possible to test the cladding between the fins and thus eliminate them as test parameters. This is desirable if the cladding thickness is to be measured or if defects in the fins are of no interest.

This paper deals with cases where the fins are integral with the cladding, but for clarity we must be careful to distinguish between the two terms. We define the cladding to be the uniform thickness of material surrounding the fuel, its OD (outer diameter) can be measured at points between the fins which are defined as the protuberances beyond the cladding OD. For example, in Fig. 1 the cladding OD is 9.21 mm (0.362 in) and there are three fins each 1.27 mm (0.045 in) high.

CLADDING-THICKNESS MEASUREMENT

It was necessary to check the concentricity of core and cladding of the prototype fuel element (now discontinued) shown in Fig. 1. The element is made by extruding aluminium cladding with integral fins over a uranium core.

The cladding thickness was measured in the region between the fins with a hand-held probe coil and simple indicating instrument. The fins affected the test in three ways:

- (1) They limited the proble coil size;
- (2) They made fabrication of calibration standards difficult; and
- (3) They led to a small uncertainty in the measured cladding thickness.

An instrument [2] used to measure the cladding uniformity of a flat fuel element was modified so that a single probe coil could be used in an Owen bridge circuit (Fig. 2). It was calibrated against standards with known cladding thickness. For a production version, an internal oscillator would be used and the output meter would be scaled to read the cladding thickness directly.

The probe coil, Fig. 3, was designed so that it could be held in contact with the cladding. It had to be narrow to fit between the fins and short so



Fig. 3

Probe coil and holder - sectional views

that skewing to accommodate the fin helix (one revolution/1.5 m (5 ft)) was not necessary.

The coil consisted of 350 turns of No. 40 AWG (American Wire Gauge) enamelled copper wire wound on a ferrite E core and mounted in a Lucite



Cladding-thickness meter calibrations

former. This was encapsulated in a steel sleeve with epoxy resin and the bottom of the probe was ground to the profile of the fuel element.

The test frequency was determined experimentally and was chosen so that the output meter indication was linear over the range of cladding thickness 0.64 ± 0.13 mm (0.025 ± 0.005 in). Figure 4 shows that the best linearity was obtained at 5 kHz for standards without fins and at approximately 6 kHz for finned standards. If the curvature of the fuel cladding is ignored and the standard depth of penetration formula [1] is used to calculate a test frequency for 0.64 mm (0.025 in) a value of 16 kHz is obtained. As the uranium core has a higher resistivity than aluminium the magnitude of eddy currents at the core-cladding interface will be higher than for a solid aluminium rod. Thus, a combination of the geometrical factors and the output linearity requirement need a test frequency considerably less than an approximate theoretical value.

The preparation of calibration standards presented several problems. The initial tests were made with standards without fins. These were machined with reference to the uranium core to ensure a uniform cladding thickness. Comparison with samples of finned fuel elements showed that the fins affected the test-coil impedance and thus the calibration. The effect on the calibration was frequency dependent. Various shielding materials were used to shield the coil from the fins but complete shielding could not be achieved. Magnetic materials gave the best results and the coil was mounted in a mild steel sleeve.

Finned standards were prepared by the extrusion cladding of a uranium core with machined diameter steps in the normal production process. It was not possible, however, to eliminate eccentricity of the core so that the cladding thickness between the fins was not uniform. Eccentricity of the



Fig. 5 Geometry of fuel with eccentric core

core and cladding will introduce an uncertainty in the measured value but it is a case that will be met in practice and must be considered.

Figure 5 shows a section of fuel with an eccentric core. It is assumed that the eddy-current coil will indicate the cladding thickness half way between the fins. For arcs AB and CA, this value will be close to the mean cladding thickness if the eccentricity is small; however, this is not so for arc BC. Measurements between each pair of fins will give three values from which the eccentricity and wall-thickness variations can be calculated, but this is not desirable for a production test. To ensure that fuel with out-of-tolerance cladding is not passed because of uncertainty in the measurement, two approaches can be used:

(1) Reduction of the cladding-thickness tolerances. This could result in the unnecessary rejection of some concentric elements.

(2) Rejection of the fuel if the difference between any two of three readings at the same cross-section exceeds a specified limit. This the preferred method.

Cladding-thickness measurements, after the instrument had been calibrated against finned standards with 0.051-mm eccentricity (the best available), agreed with results obtained by destructive examination to 0.0381 mm.

FLAW DETECTION IN SINTERED ALUMINIUM PRODUCT (SAP) TUBING

The equipment described in the Appendix was used to locate flaws in the SAP tubing shown in Fig. 6. A visual inspection indicated that the tubing was of good quality with some minor scoring in the internal diameter (ID).

An internal bobbin probe was used because it gave a better signal-tonoise ratio and fill factor. The internal coil was more sensitive to flaws in the cladding than to flaws in the fins which are less important.

The probe consisted of two identical coils of 300 turns of No. 36 AWG enamelled copper wire wound in grooves 2.38 mm \times 2.38 mm $(3/32 in \times 3/32 in)$ spaced 1.58 mm (1/16 in) apart on a 14-mm (0.55 in) diam. Teflon former.



Cross-section of SAP tube

The coils were connected as two active arms of the carrier-amplifier bridge unit. The bridge output was monitored on the oscilloscope and a permanent test recording was obtained for each tube from the external recorder.

The tubes were mounted vertically and the probe coil was driven along the tube ID by an air cylinder which could be controlled to give variable scanning speeds.

The operating frequency of the equipment used was 25 kHz (standard) and 15 or 50 kHz (special units). Attenuation in the finned tube was determined by comparing the EMF induced in concentric coils with and without the tubing between them [3]. The results are shown in Fig. 7. At 15 kHz, the field strength is 90% attenuated so that an internal coil will be insensitive to flaws at the tip of the fins.

A calibration tube was made by drilling holes right through the cladding between the fins, the diameters were 0.127, 0.254 and 0.343 mm (0.005, 0.010 and 0.0135 in). The drilled holes were readily detected at all three available frequencies with a scanning speed of 0.25 m/s (50 ft/min). The carrier amplifier and recorder sensitivities were adjusted to give suitable deflection on the recorder. A typical calibration trace is shown in Fig. 8. The sensitivity was not the same for both directions of probe travel, which is common for this type of test. We consider that a defect indication must be obtained in both directions of probe travel to be a cause for rejecting the tube. The repeatability of scans was very good. Defects within 2 cm (3/4 in) from the end of the tubes could not be detected owing to the end effect. The tubes were tested before being cut to their final length so that the end effect was unimportant.

A number of defect indications were observed with amplitudes larger than that given by a 0.13-mm (0.005-in) hole in the calibration tube, which

10



Attenuation of magnetic field by SAP tube



TEST FREQUENCY 15 kHz SPEED OF SCAN 50 ft/min. "O" BRIDGE SENSITIVITY 20 OFFNER RECORDER SENSITIVITY 0.2 V/CM CAPACITOR 0.3 µF

Fig. 8

Recording from calibration tube

did not coincide with observed scratches on the tube surface. The cause of these defects was established as clusters of small magnetic inclusions < 0.025-mm diam. which were very difficult to locate by normal metallur-

٠.



SAP finned tube

(a) Indication with no magnetic field(b) Indication with saturating magnetic field

gical methods, although the location could be marked on the tube within an area of $3.18 \text{ mm} \times 3.18 \text{ mm} (1/8 \text{ in} \times 1/8 \text{ in})$. The magnetic nature of the inclusions was demonstrated by repeating the test in a saturating magnetic field, when it was observed that the defect indication was greatly reduced in size (Fig. 9).

In the tests to confirm and establish the cause of defect indications radiography and dye penetrant methods were used without success. The limitations of these techniques were mainly due to the finned profile of the tubing.

FLAW INSPECTION OF ALUMINIUM-CLAD FUEL ELEMENTS FOR NRU

NRU fuel elements with the cross-section shown in Fig. 10 are inspected for flaws before assembly into fuel rods. The instrumentation used is identical to that used for the SAP tubing test and is desribed in the Appendix.

The elements are 3.05 m (10 ft) long with a maximum diam. of 9.6 mm (0.376 in). They are scanned vertically through an encircling differential coil pair with 0.127 mm (0.005 in) diametral clearance. Guides above and below the coil housing ensure that the element is centred in the coils. The vertical scan reduces noise due to lateral movement between the element and the coils which is often present in horizontal scanning systems. It requires a small floor area but has the disadvantage of needing head room equal to twice the length of the fuel. At Chalk River, the coil housing is mounted near the ground level and the elements are lowered into a hole in the floor.

Test parameters were established by experiment; the testing frequency is 25 kHz and the scanning speed is 0.18 m/s (35 ft/min).

The test is sensitive to defects both in the fins and cladding. We consider that the eddy currents flow around the outer surface of the tube in paths approximately parallel to the profile of the fins and cladding. The calibration element used for the routine checking of the operation of the equipment has artificial defects which have been introduced into the cladding between the fins. A typical calibration trace is shown in Fig. 11. On early production elements defects in the core surface were detected, and confirmed by



A.J. OTTER

12



Typical defects, and recorder outputs, on fins of NRU fuel cladding

(a) Iron oxide inclusion near base of fin(b) Tear at the top of a fin

radiography. A manufacturing modification eliminated this type of defect. This inspection method replaced a complete fatiguing and visual examination of each element. As false defect indications occur because of bends or other tolerable discontinuities, each defect location is carefully found and checked. The inspector decides whether to accept or reject the element. Typical defects and the corresponding recorder output signals are shown in Fig. 12.

SUMMARY

Our aim in the tests described has been to minimize the effect of the fins on the test method wherever possible. In the third test, in which an encircling coil is used, flaws in the cladding as well as in the fins can be detected so the fins do not prevent a satisfactory test.

The instrumentation used is simple and inexpensive and it has not been necessary to use complicated discrimination methods to eliminate unwanted variables.

A.J. OTTER

APPENDIX

USE OF AN OSCILLOSCOPE WITH A PLUG-IN CARRIER AMPLIFIER AS AN EDDY-CURRENT TEST INSTRUMENT

We have successfully used an oscilloscope with a plug-in carrieramplifier module for several eddy-current testing applications. Such equipment is common in many instrument laboratories and we consider that, for many applications, its performance is equivalent to that of higher-priced specialized eddy-current instrumentation.

The carrier amplifier is designed to measure impedance changes and is most commonly used with resistive or capacitive transducers. An oscillator drives a bridge circuit with one to four active arms. The output due to bridge unbalance is amplified, fed to a detector-demodulator circuit and thence to the main vertical amplifier. A switch on the plug-in unit allows the operator to display either the 25-kHz carrier signal for bridge balancing, or the demodulated DC level which is used as the test output.

For eddy-current testing, we connect two identical coils in parallel with two of the bridge arms, Fig. 13. The balance controls built into the carrier amplifier are limited in range so that, even if the coils are wound identically, it may be necessary to use an external balance box containing variable resistance and inductance components in series with one or both coils to attain balance. In practice, harmonics (attributed to the presence of magnetic materials in the coils) do not allow a perfect null and so a minimum bridge output is taken as the balance point. A block diagram of the equipment is shown in Fig. 14. The standard carrier-amplifier frequency



Fig. 13 Bridge circuit arrangement



Fig. 14

Equipment for eddy-current testing with oscilloscope and plug-in carrier amplifier

is 25 kHz with a bandwidth of 6 kHz. At Chalk River, we have obtained special units with operating frequencies of 5, 15 and 50 kHz.

Usually, permanent test records are required. We use an oscilloscope with the vertical amplifier voltage brought out to a terminal so that connection to recorder with a high input impedance is easily made.

Sophisticated means of rejecting unwanted variables are, of course, not possible with this equipment, although a bridge unbalance method [4] could be used. In this respect, we support observations by HOLT [5] that the sensitivity of testing is reduced and phase methods should not be used on thin-walled tubing. Furthermore, for many applications, the provision of these features is unnecessary.

For flaw detection, we normally differentiate the output signal to obtain sharper pulses on the recorded trace and to eliminate some noise due to dimensional changes [6] or to relative movement between the test piece and coils. This is done by connecting a capacitor in series with the recorder. The size is determined experimentally as it depends on the relative speed of the coils and the test piece. We usually make the recorder trace unidirectional by connecting a diode across the input terminals.

REFERENCES

- HOCHSCHILD, R., Progress in Non-Destructive Testing <u>1</u> (STANFORD, E.G. and FEARON, J.H., Eds.) Heywood and Co., London (1958).
- [2] JONES, A.R., An Eddy Current Device for Measuring Aluminium Cladding on Uranium Fuel Elements, AECL 560, (1958).
- [3] Non-Destructive Testing Handbook, II (McMASTER, R. C., Ed.) Ronald Press, New York (1959) p. 38. 16.
- [4] LIBBY, H. L., "Introduction to Eddy Current Methods and Techniques", ASTM Special Technical Publication No. 223, Symp. on Non-Destructive Tests in Field of Nuclear Energy, ASTM (1958).

- [5] HOLT, R.C., "Eddy Current Testing of Small Diameter Tubing", Proc. 3rd Ann. Symp. on Non-Destructive Testing of Aircraft and Missile Components. San Antonio, Texas (1962).
- [6] HOCHSCHILD, R., "Modulation Analysis A New Instrumentation Technique for Eddy Current Testing", Non-Destructive Testing XVIII No. 5 (1960) 323.

MICRORADIOGRAPHIC FUEL INVESTIGATION IN THIN LAYERS

R. NEIDER AND P. DE MEESTER STUDIECENTRUM VOOR KERNENERGIE, MOL BELGIUM

Abstract — Résumé — Аннотация — Resumen

MICRORADIOGRAPHIC FUEL INVESTIGATION IN THIN LAYERS. The fuel elements of most high-flux MIR-reactors are assemblies of rolled plates or coextruded tubes. A typical case are the BR-2 elements which consist of an enriched Al-U24% alloy core and are clad with aluminium.

Besides a sufficient bond integrity between core and cladding the U²³⁵ should be homogeniously distributed over the whole area of the core. Bad bonding or inhomogenious distribution of fuel may give rise to hot spots which may cause a failure of the fuel element.

The distribution and location of fuel within the plates or tubes is checked by radiographic, gamma-graphic and scintillation scanning methods. Except for marked uranium inclusions, little attention has been given to fuel homogeneity on the micro-scale, though this may help in a better understanding of many fuel hetorogeneity phenomena. However the methods mentioned can hardly detect small inhomogeneities with a diameter less than 0.5 mm.

Therefore a contact microradiographic method was developed, which yields a maximum resolution of about 30 μ m. The plates or tubes are radiographed with 60-keV X-rays while fine-grained photographic emulsion is in intimate contact with the investigated area. The fuel distribution is checked qualitatively by 10- to 30-fold enlargements of the film on paper and quantitatively by photometric density measurements.

For calibration purposes a wedge step of clad A1-U24% is radiographed under the same conditions as the test pieces and developed simultaneously. Exposure data for the used fine-grained emulsions as well as qualitative and quantitative test results are given for rolled plates and coextruded tubes.

EXAMEN PAR MICRORA DIOGRAPHIE DU COMBUSTIBLE EN COUCHES MINCES. Les éléments combustibles de la plupart des réacteurs d'essai de matériaux à haut flux se présentent sous la forme de plaques laminées ou de tubes obtenus par co-extrusion. Un cas typique est constitué par les éléments du réacteur BR-2 qui comportent une âme en alliage Al-U enrichi à 24% sous gaine en aluminium.

Il faut non seulement une bonne liaison entre l'âme et la gaine, mais aussi une répartition homogène de l'uranium-235 dans toute l'âme. Une mauvaise liaison ou une répartition non homogène risque de provoquer des points chauds qui peuvent entraîner une rupture de l'élément combustible.

La répartition et le positionnement du combustible dans les plaques ou tubes sont vérifiés par radiographie, gammagraphie et exploration à l'aide de scintillateurs. Exception faite des fortes inclusions d'uranium, on s'est peu préoccupé de l'homogénéité du combustible à l'échelle microscopique, bien que cela pût contribuer à une meilleure compréhension de plusieurs phénomènes dus à son hétérogénéité. Cependant, les méthodes mentionnées permettent difficilement de détecter les petites zones de non homogénéité ayant un diamètre inférieur à 0,5 mm.

C'est pourquoi on a élaboré une méthode de microradiographie par contact qui assure un pouvoir de résolution maximal d'environ $30 \ \mu\text{m}$. Les plaques et tubes sont radiographiés avec des rayons X de 60 keV. l'émulsion photographique à grain fin se trouvant en contact direct avec la zone étudiée. La répartition du combustible est vérifiée qualitativement en agrandissant l'image de 10 à 30 fois sur du papier et mesurée quantitativement au moyen de la densité photométrique.

A des fins d'étalonnage, une section en coin de l'élément en alliage AI-U enrichi à 24% est radiographiée dans les mêmes conditions que les pièces à essayer et les films sont développés en même temps. Les auteurs indiquent les données relatives à l'exposition des émulsions à grain fin utilisées, ainsi que les résultats des contrôles quantitatifs et qualitatifs pour les plaques laminées et les tubes obtenus par co-extrusion.

МИКРОРАДИОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКИХ СЛОЕВ ТОПЛИВА. Топливные элементы большинства реакторов для испытания материалов (MTR) с высокой плотностью нейтронного потока представляют собой сборки катаных пластин или коэкструдированных

2

17

трубок. Типичными в этом отношении являются элементы B-2, которые состоят из сердцевины, представляющей собой сплав алюминия и урана 24%-ного обогащения, алюминиевого покрытия.

Помимо достаточно прочной связи между сердцевиной и оболочкой необходимо также, чтобы уран-235 был равномерно распределен по всей области сердцевины. Плохая связь или неравномерное распределение топлива могут привести к образованию точек перегрева, что может вызвать повреждение топливного элемента.

Распределение топлива внутри пластин или трубок проверяется с помощью методов радиографического, гаммаграфического и сцинтилляционного скеннирования. За исключением заметных включений урана, гомогенности топлива в микромасштабе уделяется мало внимания, хотя это может помочь лучше понять многие явления гетерогенности топлива. Однако с помощью вышеупомянутых методов едва ли можно обнаружить небольшие очаги неоднородности диаметром менее 0,5 мм.

Поэтому был разработан контактный микрорадиографический метод, имеющий максимальную разрешающую способность почти 30 ммк. Пластины или трубки подвергаются облучению ренттеновскими лучами 60 кэв, а мелкозернистая фотоэмульсия плотно прижимается к обследуемой области. Распределение топлива проверяется качественно путем печатания с пленки на бумагу с 10-30-кратным увеличением, а количественно-с помощью фотометрических измерений плотности.

Для калибровки ступенчатый клинообразный образец из алюминия и 24%-ного урана с покрытием подвергается радиографии при тех же условиях, что и испытуемые отрезки, и пленка одновременно проявляется. Приводятся данные по облучению использовавшейся эмульсии, а также качественные и количественные результаты испытаний катаных пластин и коэкструдированных трубок.

ESTUDIO MICRORRA DIOGRAFICO DE COMBUSTIBLES EN CAPAS DELGA DAS. Los elementos combustibles de la mayoría de los reactores de flujo elevado destinados al ensayo de materiales (MTR) consisten en conjuntos de chapas laminadas o tubos coextruidos. Caso típico son los elementos del BR-2, formados por un alma de aleación de 24% de U enriquecido -Al con revestimiento de aluminio.

Además de requerirse una unión perfecta entre alma y revestimiento, el ²³⁵U debe estar distribuido homogéneamente en el alma. Una unión deficiente o una distribución irregular del combustible pueden originar puntos calientes que, a su vez, provocarán la falla del elemento combustible.

La distribución y localización del combustible dentro de las placas o tubos se verifica por radiografía, gammagrafía y exploración centelleográfica. Salvo por lo que hace a inclusiones muy notables de uranio, se ha prestado escasa atención al estudio de la homonegeneidad del combustible en nicroescala, aunque éste puede contribuir a una mejor comprensión de numerosos fenómenos atribuibles a la heterogeneidad del combustible. Sin embargo, los métodos mencionados no alcanzan a localizar heterogeneidades de diámetro inferior a 0,5 mm.

Por consiguiente, se perfeccionó un método microrradiográfico de contacto que permite alcanzar una resolución máxima de aproximadamente 30 µm. Las placas o tubos se radiográfían con rayos X de 60 keV, mientras una emulsión fotográfica de grano fino se halla en íntimo contacto con la zona estudiada. La distribución del combustible se verifica cualitativamente ampliando la película 10 a 30 veces sobre papel y cuantitativamente mediante mediciones fotodensitométricas.

Para fines de calibración, se radiografía en las mismas condiciones que las piezas sometidas a ensayo, una cuña de aleación de 24% de U-Al con revestimiento, y ambas películas se revelan al mismo tiempo. En la memoria se presentan datos de exposición de las emulsiones de grano fino usadas, así como resultados cualitativos y cuantitativos correspondientes a placas laminadas y tubos coextruidos.

1. INTRODUCTION

For reasons of optimum heat transfer the fuel elements of most highflux materials testing reactors are in the form of assemblies composed of relatively thin fuel plates or tubes. For instance, the BR2 fuel element (Fig.1) consists of 5 or 6 concentric tubes formed by sets of 3 sandwichtype fuel plates. These plates consist of a U24%-Al alloy core and are clad with aluminium. The rolled plates are fabricated by the picture-frame tech-



Photo of a BR2 fuel element

nique. There are plans to construct future BR2 elements out of sets of coextruded tubes.

For use in the reactor the bond integrity between core and cladding should be sufficient over the whole core area since defective bonding could cause poor heat transfer and a local heating or a so-called hot spot within the fuel element. For the same reason it is of interest to check whether the U^{235} is homogeneously distributed within the rolled plate or co-extruded tube. Marked heterogeneities in the U^{235} distribution would cause local variations in neutron flux and corresponding power and temperature distributions, which would again lead to hot-spot danger during reactor operation of the fuel element. An ultrasonic technique is used to test the bond integrity between the core and the cladding.

The location and distribution of the fuel within the fuel plates and tubes are checked by radiographic, gammagraphic and scintillation scanning methods. γ -scintillation scanning is also used for the core [1,2]. The latter technique uses a scintillation counter with a NaI(Tl) crystal and a single-channel pulse-height analyser. The surface of the fuel plates or tubes is scanned by the scintillation counter viewing through a collimator with an opening of 1 cm² or 10 mm². The 184-keV γ -peak of U²³⁵ is either measured at discrete intervals during pre-set times or continuously while recording the pulse rate. By this method one obtains data about the macrodistribution of U²³⁵.

The U24%-Al alloy is of hypereutectic composition and consists of UAl₃ and UAl₄ crystals in an aluminium matrix (Fig. 2). Generally these crystals are no longer than 1 mm. According to the fabrication procedure different textures within the distribution of the UAl₃ and UAl₄ crystals can show up. These textures and the actual dimensions of the crystals may influence the micro-distribution of neutron and heat fluxes.

However, with the above test methods it is impossible to get accurate information about the micro-distribution of fuel within areas of about 0.1 mm diam. and less, because of the graininess in normal X-ray films and the relatively large opening of the lead collimator used for the scanning. A drastic narrowing of the collimator opening is not a practical solution because of the low specific activity of the fuel. The count-rate would diminish



Fig.2

Metallographic cross-section of U24%-A1 alloy

to such an extent that no accurate measurement could be done within reasonable times.

Until now, however, a precise non-destructive method to examine the distribution of fuel in micro-regions of fuel plates or tubes did not exist. Such a method which should give qualitative as well as quantitative results would also be of interest for allowing a better study of the rolling or coextrusion process by scanning the fuel micro-distribution. In the case of rolling this could even be done between the different forming stages. To evaluate the micro-distribution of U^{235} one could visualize γ -absorption measuring technique using lead collimators with very small diameters and γ -sources of high specific activity. Another method would be the imaging of the fuel distribution by a γ -ray pin-hole camera. For the latter method it would be necessary to activate the fuel plate by thermal neutron irradiation of short duration in a flux of $10^{12} - 10^{13}$ n/s.cm². One can activate the fuel plate within short irradiation times up to a fairly high level (several Ci/cm^2 fission product activity) provided the fuel is highly enriched. This activity should be sufficient to take a picture with a γ -ray pin-hole camera [3,4]. But the resolution of such an image will, however, not be better than 0.5-1.0 mm. The activity of the fuel plate will have a relatively short halflife (about half-an-hour) because of the short irradiation time. After a cooling time of several days the plate can be handled as before without special precautions.

At this time it seems that the best method for determining the fuel distribution within micro-regions is the method of contact microradiography, which is described below.

2. PRINCIPLE OF X-RAY CONTACT MICRORADIOGRAPHY

One method of the well-known technique of microradiography is performed by placing the sample in effective contact with an extremely finegrained photographic emulsion. It is then irradiated by X-rays of adequate energy. The developed negative is enlarged with a photographic enlarging apparatus or, if high enlargements are required, with an optical or even with an electron microscope. In the latter case one has to use special electron-sensitive layers. Using soft X-rays (up to 10 keV) one can achieve a resolution of $1\mu m$. By the application of a suitable calibration procedure X-ray microradiography can also be evaluated quantitatively giving results for the thickness (cm) or mass thickness (g/cm²) of the radiographed object at different spots. The calibration can be achieved by using a wedge step of the investigated material.

Some work has already been done on contact microradiography and projection microradiography of nuclear-fuel materials. SHARPE [5] and CONDE [6] worked with an X-ray microscope based on the Cosslet-Nixon design and radiographed several materials of interest in the nuclear field. CONDE radiographed coated fuel particles and showed images with an enlargement up to 200. McCLUNG [7] did similar work using contact microradiography. He showed examples of microradiographed coated uranium-carbide fuel particles and sections of graphite. All these investigations were done by using very soft X-rays of about 5 keV. For this reason the samples had to be very thin. In the case of non-destructive determination of the fuel micro-distribution in real fuel plates or tubes it is not possible to use the very soft X-rays because of the high absorption power of fuel for these Xrays and the relatively great thickness of the fuel in these objects. If the energy is increased, however, one cannot expect the same good resolution because the scattering of radiation in the sample and the photographic emulsion limits the resolution. The resolution of the final image depends essentially on

- (a) The geometrical arrangement during exposure (geometrical unsharpness);
- (b) The graininess of the photographic film; and
- (c) The scattering of radiation within the photographic emulsion (inner unsharpness).

The geometrical unsharpness in the image is given by.

$$\delta = \frac{d \times b}{a - b} \tag{1}$$

as is demonstrated in Fig.3. Because of the very short distance <u>b</u> in the case of thin fuel plates and the possibility of enlarging the distance <u>a</u>, one gets a fairly high resolution on which the diameter of the focus of the X-ray unit used does not have too much influence. If the radiograph is taken under the following conditions, as was done in our case, <u>a</u> = 100 cm, <u>b</u> = 0.09 cm, <u>d</u> = 0.45 cm, Eq.(1) yields δ = 4.05 μ m. Furthermore, there is a distortion in the contact microradiographic image which depends on the distance from the centre of the image. It is caused by the oblique illumination in all parts of the image which are not on the optical axis. The distortion results in a displacement of the image point which is given by

$$\Delta \mathbf{r} = \frac{\mathbf{b} \times \mathbf{r}}{\mathbf{a} - \mathbf{b}} \tag{2}$$



Fig.3

Geometrical arrangement for X-ray contact microradiography



Distortion (Δr) in X-ray contact microradiography

as is demonstrated in Fig.4. Under the conditions stated above, Eq.(2) yields $\Delta r = 1 \ \mu m$ for a distance of $\underline{r} = 1 \ \mathrm{cm}$. From the results of Eq.(1) and (2) it is clear that neither the lack of geometrical sharpness nor the distortion can affect details of the image with dimensions of about 0.1 mm. The second factor influencing the resolution is the graininess of the emulsion. We investigated the following emulsions:

(a) Gevaert NUC V07, a special emulsion for nuclear physics purposes on film;

(b) Gevaert Litholine Ortho p film;

(c) Gevaert Structurix D2 with the emulsion on one film side only.

MICRORADIOGRAPHIC FUEL INVESTIGATION

The NUC V07 emulsion has the finest grain with a mean grain size of $0.07 \ \mu m$, but it is also the slowest and for our purpose such very fine grain was not necessary. This emulsion is very well adapted for the post-irradiation examination of fuel, where most other emulsions are too fast.

As shown in the next section, the emulsion with the highest speed is the second one, the graininess of which is even less than that of the D2 emulsion. The Litholine film has been adopted in our laboratories for the contact microradiography of fuel plates and tubes. The inner lack of sharpness depends essentially on the energy of the X-rays. Because of the high absorption power of the fuel plates for X-rays, we had to use X-ray energies between 60 and 120 keV. The broadening of an image point by scattered radiation can be estimated to be no more than 10 μ m. Most scattered electrons are scattered in the forward direction and therefore do not contribute too much to a broadening of an image point.

3. APPLICATION OF THE METHOD

3.1. Exposure data

To get an idea of the appropriate exposure data we used 0.3-mm-thick sheets out of U24%-Al alloy to make a wedge step and radiographed this under various conditions. From several density curves, which were derived by measuring the density of the radiographs of the different steps, mean absorption coefficients for U24%-Al alloy were calculated. They are given for different energies (peak energy of the X-ray beam) in Table I.

TABLE I

Energy (keV)	μm (cm ⁻¹)	
60	17.0	
75	14.7	
105	9.8	
120 .	7.2	

MEAN ABSORPTION COEFFICIENTS FOR U24%-A1

One cannot expect these values to agree with those given in the literature [8]. The latter give values for nearly monochromatic radiation while the coefficients given here are averaged values over the whole spectrum of the X-ray tube. No special filter was used. With the aid of these coefficients it was possible to calculate the gradation curves of the investigated emulsions. For this purpose density curves were used which had been taken



Gradation curves for three different Gevaert emulsions. X-ray energy: 60 keV.. Film-focus distance: 100 cm. X-ray unit: Baltograph 200 with a full wave-rectifying system

TABLE I	I
---------	---

DEVELOPING PROCEDURE FOR THE EMULSIONS

Emulsion	Developer	Dev. time (min)	Dev. temp. (°C)
Litholine p film	GP 201	5	20
D2 emulsion on one side only	GP 201	6	20
NUC V07	G 201	15	20
All products are from Gevaert-Agfa			

from the different radiographs of the wedge step made with these emulsions. Figure 5 gives the calculated gradation curves of the three emulsions for 60 keV. The film-focus distance was 100 cm and the X-ray unit used was the Baltograph 200, equipped with a full wave-voltage rectifier. The developing procedure for the emulsions is given in Table II.

To compare the quality of the image and its resolution at different energies enlargements were made of a definite part of the radiographs taken of the wedge step with different maximum X-ray energies. Figure 6 shows the radiographic picture of the same region of the wedge step with a 30-fold enlargement taken at 60, 75, 105 and 125 keV. One sees that the quality of the different pictures decreases slightly with increasing energy, mainly because the contrast decreases. However, with an energy of 120 keV one can also take microradiographs of somewhat thicker fuel plates (up to 3 mm) which still have a fairly good image quality. As indicated (arrows) in Fig. 6 the maximum resolution for the whole range of energies up to 120 keV is about 35 μ m. In the microradiograph taken with 60 keV one can find image points which are only 20 μ m apart or less.



Fig.6

X-ray microradiographs of a 0.9-mm-thick area of a wedge step made out of U24%-Al alloy taken with 60, 75, 105, and 120 keV.



Fig.7

Construction of a wedge step simulating several core thicknesses of a clad fuel plate or tube with a constant over-all thickness

Lead screens were tried to intensify the blackening effect of the X-ray radiation on the emulsion. A NUC V07 film was placed between lead foils of $20-\mu m$ thickness and used to take a radiograph of the wedge step at 75 keV, but no intensifying effect was observed. For calibration purposes and to get exact exposure data a wedge step was used, composed of sheets of U24%-Al alloy and pure aluminium sheet. This wedge step was constructed as shown in Fig.7. It has a uniform thickness of 1.4 mm which is the mean thickness of the fuel plates and tubes to be investigated. Figure 8 shows a density curve taken of this wedge step with 60 keV on to the Litholine p









Exposure data for Al clad U24% Al with an over-all thickness of 1.4 mm. X-ray energy: 60 keV. The X-ray dose (mA x h) is given which yields a density of 1.2 on Litholine-p-film.

film. This curve allows the measured density S to be converted into the thickness d of the radiographed object if the density is constant. If this is not the case one can only measure the mass thickness (g/cm^2) .

An error calculation was made from a series of radiographs of the wedge step taken under the same conditions and developed according to the same procedure. A mean deviation of $\pm 12\%$ was found. This deviation may be caused by temporary deviations of the electron current and high voltage of the X-ray tube and by variations of the film sensitivity and of the developing procedure.

By using the gradation curve of the Litholine p film one can calculate from the density curve of Fig.8 the exposure data for different thicknesses of U24%-Al core in Al-clad tubes or plates having an over-all thickness of about 1.4 mm. Such an exposure data curve is given in Fig.9 for 60 keV.
3.2. Results

The described technique was used to take microradiographs and to make thickness or mass thickness measurements for several fuel-element materials which are of interest in our laboratory.

Figure 10 shows a 10-fold enlargement of a microradiograph taken from one corner of the core of a BR2 fuel plate. At the very end, where the core becomes thinner, one can clearly distinguish between the individual UAl_4 or UAl3 crystals. But, also in other areas the heterogeneous structure of the U24%-Al alloy is clearly visible. Figure 11 shows another microradiograph of a BR2 fuel plate with a 27-fold enlargement. Here one can also see very clearly the UAl₄ or UAl₃ crystals and how their density varies within the different areas shown in the picture. In Fig.12 is shown a microradiograph of a part of the end section of the core of a co-extruded tube. A pronounced texture along the direction of co-extrusion is visible and in addition some large irregularities. A photographic density measurement was made along the line of irregularities parallel to the texture. The results were converted into values of mass thickness and are reproduced in Fig. 13. In addition a metallographic cross-section was made along this line (Fig.14). The correspondance of the three representations is evident. Figure 15 shows another example of the end section of the core of a coextruded tube. In this case there exist very large irregularities, but the overall thickness of the area shown in the picture is smaller than that in Fig. 12. From the practical point of view these irregularities are therefore not so serious as those shown in Fig.12.

Figures 16-19 demonstrate an example of applying the contact microradiography method to the study of the rolling process. Figures 16 and 17 show microradiographs from a rolling sample before and after the final pass.

In Fig. 18 the corresponding thickness curves, which were measured along the centre line of the samples parallel to the direction of rolling, are given. Figure 19 shows the metallographic cross-section along this line. The radiographically measured thickness of the rolling sample after the last pass does not agree with the thickness measured on the metallographic cross-section; the reason might be that the density of the alloy itself deviates from the nominal value of 24%.

4. CONCLUSIONS

The described method of contact microradiography has proved to be very useful for testing thin fuel layers in rolled plates and co-extruded tubes with respect to inhomogeneities below 0.1 mm diam. It should be possible to use this method for a routine production testing. Because of the vast information accumulated by this method on several thousands of square centimetres, difficulties will arise if the evaluation of this material is not automated. For this reason the application may be reduced to the end sections of the core in the fuel plates and tubes, and to random samples of the remaining area. It has also been shown that the method is useful for the study of the rolling and co-extrusion processes.



Fig.10

X-ray microradiograph of a corner of the core of a BR2 fuel plate. X-ray energy: 60 keV; Thickness of the core 0.5 mm.





X-ray microradiograph of a BR2 fuel plate. X-ray energy: 60 keV Thickness of core: 0.5 mm



Fig	19
1.1K*	

X-ray microradiograph of the end-section of the core of a co-extruded fuel tube. X-ray energy: 60 keV; Thickness of the core in the homogeneous area; 0.6 mm.





Distribution of the mass thickness of the core along the line of heterogeneities shown in Fig. 12. The mass thickness was calculated using the value of 3.4 g/cm^3 for the density of U24% Al.



Fig.14

Metallographic cross-section along the line of heterogeneities shown in Fig. 12.



Fig. 15

X-ray microradiograph of the end section of the core in a co-extruded tube. The mean thickness of the core in this region is about 0.2 mm. X-ray energy: 60 keV.



Fig. 16

X-ray microradiograph of an Al-clad rolling sample of U24%-A1 with a core thickness of 0.6 mm before the last rolling step. X-ray energy: 60 keV.





X-ray microradiograph of the same object as in Fig. 16 but after the last step of rolling. Core thickness: 0.5 mm. Same conditions as in Fig. 16.





Distribution of the core thickness of the rolling sample before and after the last step of rolling. The distribution was measured along the centre line of the probe parallel to the rolling direction.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank Mr. M. Moulaert from the Physics Department of S.C.K. for his technical assistance. One of the authors (R.N.)



Fig. 19

Metallographic cross-section along the centre line of the rolling sample after the last step of rolling.

thanks S.C.K. for making his stay at S.C.K. possible and the Bundesminister für Wissenschaftliche Forschung, Bad Godesberg, Federal Republic of Germany for the financial support.

REFERENCES

- DE MEESTER, P., BRABERS, M. J. and DEKNOCK, R., "Fuel Uniformity in Sandwich Plates", Brit. J. Non-Destr. Test. 6 No.4 (1964) 123-29.
- [2] DE MEESTER, P., "Fuel location, homogeneity and amount in flat and tubular configurations", these Proceedings (SM 63/42).
- [3] GREENFIELD, M. A. and KOONTZ, R. L., "The Design Basis for Pin-Hole y-Ray Cameras", NAA-SR-9924 (1964).
- [4] BECK, W.N., "A Pin-Hole Camera Autoradiographic Technique for Encapsulated Fuel Specimens", ANL 6533 (April 1962).
- [5] SHARPE, R.S., "Some Applications of Microtadiography to Fuel Element Inspection", Fuel Element Fabrication 2 IAEA, Vienna (1960) 45.
- [6] CONDE, J. F.G., The Application of X-Ray Projection Microscopy to the Quality Control and Inspection of Coated Particle Fuels for the Dragon Reactor Experiment, Dragon Project Report EURATOM, communication 346 D. P. Report 215.
- [7] McCLUNG, R. W., "Studies in Contact Microradiography", Mater. Res. and Standards <u>4</u> No. 2 (1964) 66-69.
- [8] FOSTER, B.E. and EVANS, J.W., "X-Ray Mass Attenuation Coefficients in the Range of 50 to 150 kvp", Non-Destr. Test. (Jan. -Feb. 1963) 51-58.

DISCUSSION

R. SHARPE: Have you tried any stereographic techniques to get more precise information about the depths of individual fuel particles?

R. NEIDER: No, we have not.

R. SHARPE: We are continually being presented with tests capable of detecting smaller and smaller defects and inhomogeneities. Do we know enough about the significance of these defects to warrant developing such tests into production inspection procedures? R. NEIDER: It is possible that even very small defects may cause failure of the fuel element during reactor operation. Some of these defects may in fact be great enough to be detected by conventional radiography but with others this will certainly not be the case. It should be stressed, however, that the main advantage of this technique is in connection with production studies. With microradiography it is not only possible to detect the defects but also to interpret them in terms of microstructure.

G.H. TENNEY: Since the paper was not available in advance, I have not been able to study it and there are several points which are not clear to me, for instance the thickness data. Has the film density been translated into thickness? If so, what was the width of the light beam of the microdensitometer and was scanning done continuously? The accuracy of the data is, of course, a function of this measurement technique. Moreover, the step wedge used to determine the uranium alloy content cannot be taken at its face value because the ratio of uranium to aluminium is not known for the specimen. I am therefore not too sure about the thickness data.

R. NEIDER: The film density is translated into core thickness assuming a constant core density. Otherwise, the density has to be converted into mass thickness data.

The microdensitometer aperture was about 0.2 mm in diameter. Scanning was not done continuously.

I think it is correct to convert the photographic density values into core thickness values using the calibration curve which we got from a radiograph of the wedge step shown in Fig. 7. Of course, this is only true if the U-Al alloy always has the same composition, and if the over-all thickness of the tested plate or tube is the same as that of the wedge step.

D. HORVAT: Have there been any difficulties due to mottling in the radiographs as a result of diffraction?

R. NEIDER: We did not have any difficulties caused by diffraction. I don't think we need expect such difficulties because the wavelength of our X-rays is very small compared with the details observed. Moreover, we do not have coherent radiation thanks to the relatively great focus of the X-ray tube.

•

DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN URANIUM DANS LES ALLIAGES A BASE D'ALUMINIUM

J. GÉRARD ET L. VAN HOVE S.A. MÉTALLURGIE ET MÉCANIQUE NUCLÉAIRES DESSEL, BELGIQUE

Abstract — Résumé — Аннотация — Resumen

DETERMINATION OF THE URANIUM CONTENT OF ALUMINIUM ALLOYS. Many materials testing reactors use as fuel an alloy of aluminium and enriched uranium. The amount of U²³⁵ in each fuel element must be known accurately.

The techniques used to determine this are not only simple in principle but also varied; they include measurement of the alloy density, counting of the γ -activity of the U²³⁵, chemical analysis, determination of the isotopic content and evaluation of radiograph blackening. Unfortunately, all these methods possess more or less serious disadvantages when used for inspection on an industrial scale.

The measurement of alloy density by Archimedes' method gives sufficiently accurate results if care is taken and the densities of the constituent metals are exactly known. The procedures employed, however, make this a very slow method. Moreover, the isotopic content must be known with great accuracy if the amount of U^{235} contained is to be determined.

Counting the γ -activity of the U²³⁵ yields a direct evaluation of this isotope, but the many parameters of a single-channel spectrometer require the use of accurately known standards and exceptionally stable counting facilities. Nevertheless, this method is in the authors' opinion the most suitable one for determinations on an industrial scale; and although the choice of standards requires care, and it is a slow and expensive matter to establish them, for any given level of production the choice is made once and for all, the only practical difficulty being to ensure the continued electronic stability of the installation.

The other methods mentioned – chemical and isotopic analyses, and densitometry – are not in common use. Measurement of the blackening of a radiograph is not sufficiently precise and does not permit the determination of uranium content with the required degree of accuracy. Densitometric examination of radiographs is nevertheless very useful, even indispensable, in assessing the homogeneity of an alloy or its mean content compared with two extreme standards on the same negative. Chemical and isotopic analyses can be very accurate, but they are also destructive: certain working precautions must be taken in order on the one hand to eliminate errors due to chemical impurities in the alloy, and on the other to allow for the presence of the different uranium isotopes, the proportions of which must be known for an exact calculation of the U^{235} content.

Finally, the authors show that the measurement of uranium content must be carried out in several stages, each involving all the resources of relatively simple techniques. The value and limits of each technique are discussed. The choice of standards is based on the evidence of radiographs. The exact U^{235} content of the standards is determined by chemical and isotopic analyses.

Production-line inspection is carried out by measuring the alloy density or by counting the γ -activity of the U²³⁵. The precision of the two methods is comparable (± 0.5% relative to the uranium content). From the economic point of view the authors recommend determining the U²³⁵ content by γ -counting whenever a large number of components of a given shape have to be inspected.

This subject has already been dealt with. The paper reports and discusses the results of an industrial experiment.

DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN URANIUM DANS LES ALLIAGES A BASE D'ALUMINIUM. De nombreux réacteurs d'essai de matériaux utilisent un alliage d'aluminium et d'uranium enrichi comme combustible. La quantité d'uranium-235 de chaque élément combustible doit être connue avec précision.

Les techniques utilisées pour cette détermination sont simples en principe et d'ailleurs variées; le mémoire cite les méthodes suivantes: mesure de la densité de l'alliage, comptage de l'émission gamma de l'uranium-235, analyse chimique, détermination de la teneur isotopique et évaluation du noircissement d'un cliché radiographique. Malheureusement, chacune de ces méthodes présente des inconvénients plus ou moins graves lorsqu'on l'applique au contrôle d'une production importante.

35

La mesure de la densité de l'alliage par la méthode d'Archimède donne des résultats suffisamment précis si l'on opère avec soin et si l'on connaît exactement la densité des métaux constituants. Les conditions opératoires rendent cependent la méthode assez lente. Il faut, en outre, connaître la téneur isotopique avec une grande précision pour la détermination de l'uranium-235 contenu.

Le comptage de l'activité gamma de l'uranium-235 permet l'évaluation directe de cet isotope. Cependant, les nombreux paramètres d'un spectromètre monocanal exigent l'utilisation d'étalons parfaitement connus et une installation d'une exceptionnelle stabilité de comptage. Toutefois, de l'avis des auteurs, cette méthode est la plus recommandable pour effectuer des déterminations à une cadence industrielle. En contrepartie, le choix des étalons exige des précautions et leur établissement est lent et coûteux. Pour une production donnée, cependant, ce choix est fait une fois pour toutes et la seule difficulté pratique est de veiller à la stabilité électronique de l'installation.

Les autres méthodes citées, les analyses chimiques et isotopiques et les mesures densitométriques ne sont pas appliquées couramment. La mesure du noircissement d'un cliché radiographique n'est pas suffisamment précise et ne permet pas d'évaluer une teneur en uranium avec l'exactitude désirée. Les examens densitométriques de clichés radiographiques sont néanmoins très utiles, sinon indispensables pour apprécier l'homogénéité de l'alliage ou sa teneur moyenne comparée à deux étalons extrêmes figurant sur le même cliché. Les analyses chimiques et isotopiques peuvent être très précises, mais elles sont destructives. Certaines précautions opératoires doivent être prises, d'une part, pour éliminer les erreurs dues aux impuretés chimiques de l'alliage et, d'autre part, pour tenir compte de la présence des différents isotopes de l'uranium dont il faut connaître la proportion pour le calcul exact de la teneur en ²⁵U.

En conclusion, on montre que la mesure de la teneur en uranium doit se faire en plusieurs étapes faisant intervenir toutes les ressources de méthodes relativement simples. On indique la valeur et les limites de chaque étape. Le choix des étalons est basé sur l'examen de clichés radiographiques. La mesure de leur teneur exacte en ²³⁵U est effectuée grâce à des analyses chimiques et isotopiques.

Le contrôle en cadence industrielle est réalisé par mesure de densité de l'alliage ou par comptage de l'émission gamma de 235 U. La précision des deux méthodes est comparable (± 0, 5% relatif). Au point de vue économique, on en arrive à recommander la détermination de la teneur par comptage gamma chaque fois qu'une grande série d'examens est nécessaire sur des pièces de forme déterminée.

Ce sujet a déjà été traité. Le mémoire relate et discute les résultats d'une expérience industrielle.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УРАНА В СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ. Во многих реакторах для испытания материалов сплав алюминия и обогащенного урана используется в качестве топлива. Количество урана-235 в каждом топливном элементе должно быть точно известно.

Использованные для этого определения методы просты в принципе и к тому же разнообразны. Приводятся следующие методы: измерение плотности сплава, отсчет гамма-излучения урана-235, химический анализ, определение изотопного содержания и оценка потемнения радиографического снимка. К сожалению, каждый из этих методов страдает более или менее серьезными недостатками на практике, когда это касается контроля важной продукции.

Измерение плотности сплава методом Архимеда дает достаточно точные результаты, если этот метод применяется осторожно и если точно известна плотность составных металлов. Вместе с тем, на практике этот метод является очень медленным. Кроме того, надо очень точно знать изотопное содержание, чтобы определить количество урана-235.

Регистрация гамма-активности урана-235 позволяет непосредственно давать оценку этому изотопу. Однако многие параметры одноканального спектрометра обусловливают применение хорошо известных эталонов и создания исключительной устойчивости регистрации. И все же, по нашему мнению, этот метод является наиболее целесообразным для анализовв промышленном масштабе. С другой стороны, выбор эталонов требует соблюдения мер предосторожности, а их разработка является медленным и дорогостоящим процессом. Но для данной продукции, как только будет сделан выбор, единственным практическим затруднением окажется наблюдение за электронной устойчивостью установки.

Другие вышеуказанные методы, а именно химические и изотопные анализы и денситометрические измерения, обычно не применяются. Измерение потемнения радиографического снимка не является недостаточно точным и не позволяет определять содержание урана с желаемой точностью. Тем не менее, денситометрические исследования радиографических снимков являются очень полезными, а часто и необходимыми для оценки гомогенности сплава или его среднего содержания, сравнимого с двумя крайними эталонами, имеющимися на том же снимке. Химические и изотопные анализы могут быть очень точными, но они являются разрушительными. Определенные эксплуатационные предосторожности должны быть приняты, чтобы, с одной стороны, устранить ошибки, обусловленные наличием химических примесей в сплаве, а с другой-учесть наличие различных изотопов урана, в отношении которых необходимо знать соотношение для точного расчета содержания урана-235.

В заключение говорится, что измерение содержания урана необходимо проводить в несколько этапов с использованием всех относительно простых методов. Указывается на значение и пределы каждого этапа. Выбор эталонов основан на изучении радиографических снимков. Измерение точного содержания урана-235 проводится на основе химических и изотопных анализов.

Контроль в промышленном масштабе осуществляется путем измерения плотности сплава или по уровню гамма-излучения урана-235. Точность обоих методов сравнима (относительно ±0,5%). С экономической точки эрения рекомендуется проводить определение содержания путем счета гамма-частиц в случае необходимости проведения большой серии исследований на предметах определенной формы.

DETERMINACION DEL CONTENIDO DE URANIO EN LAS ALEACIONES A BASE DE ALUMINIO. Muchos reactores para ensayo de materiales utilizan como combustible una aleación de aluminio y de uranio enriquecido. Es necesario conocer con precisión la cantidad de uranio-235 contenida en cada elemento combustible.

Los procedimientos utilizados para esa determinación son en principio sencillos y además variados; pueden citarse los siguientes: la medición de la densidad de la aleación, el recuento de la emisión gamma del uranio-234, el análisis químico, la determinación del contenido isotópico y la evaluación del ennegrecimiento de una placa radiográfica. Por desgracia cada uno de esos métodos ofrece inconvenientes más o menos graves cuando se los utiliza para controlar una producción importante.

La medición de la densidad de la aleación por el método de Arquímedes da resultados bastante precisos cuando se procede con cautela y cuando se conoce con exactitud la densidad de los metales que constituyen la aleación. Ahora bien, las condiciones en que se realiza la operación hacen que el método sea algo lento. Además, es necesario conocer el contenido isotópico con gran precisión para determinar el uranio-235 contenido. El recuento de la actividad gamma del uranio-235 permite evaluar ese isótopo de manera directa. Aunque los numerosos parámetros de un espectrómetro monocanal exigen la utilización de patrones perfectamente conocidos y una instalación de recuento de excepcional estabilidad, este método es a juicio de los autores, el más recomendable para efectuar determinaciones a una cadencia industrial. Pero por otra parte, la elección dada, la elección se efectú a una sola vez y la única dificultad práctica es lograr la estabilidad electrónica de la instalación.

Los otros métodos citados, a saber, los análisis químicos e isotópicos y las medidas densitométricas no suelen aplicarse en la práctica. La medición del ennegrecimiento de una placa radiográfica no es bastante precisa y no permite evaluar el contenido de uranio con la exactitud necesaria. Con todo, el examen densitométrico de esas placas es muy útil, e incluso indispensable, para apreciar la homogeneidad de la aleación o su contenido medio en relación con dos patrones extremos que figuran sobre la misma placa. Los análisis químicos e isotópicos pueden dar resultados muy precisos, pero la operación tiene carácter destructivo. Hay que adoptar ciertas precauciones, por una parte para eliminar errores derivados de impurezas químicas de la aleación y por otra para tener en cuenta la presencia de los diferentes isótopos del uranio, cuya proporción es menester conocer para poder calcular con exactitud el contenido de uranio-235.

En conclusión, la determinación del contenido de uranio debe efectuarse en varias etapas aprovechando todas las posibilidades que ofrecen unos métodos relativamente sencillos. Los autores indican el valor y los límites de cada etapa. La elección de los patrones se basa en el examen de placas radiográficas. La determinación de su contenido-exacto de uranio-235 se efectúa mediante análisis químicos e isotópicos. El control, cuando las operaciones se realizan a una cadencia industrial, se hace midiendo la densidad de la aleación o contando los rayos gamma emitidos por el uranio-235. Ambos métodos permiten obtener resultados de una precisión relativa comparable (± 0, 5%). Desde el punto de vista económico, se puede recomendar la determinación del contenido por recuento de la emisión gamma, siempre que sea necesario llevar a cabo muchos exámenes de piezas de una forma determinada.

1. INTRODUCTION

Dans les réacteurs du type MTR, la connaissance précise de la quantité d'uranium-235 dans chaque élément combustible est de la plus grande importance. L'exploitant du réacteur désire disposer d'un flux minimal et uniforme.

Le combustible le plus utilisé dans les réacteurs d'essais de matériaux est l'alliage d'aluminium et d'uranium enrichi. Les méthodes de détermination de la teneur en uranium sont variées et largement diffusées. Citons:

la mesure de la densité de l'alliage;

le comptage de l'émission gamma de l'uranium-235; l'analyse chimique;

la détermination de la teneur isotopique et l'évaluation du noircissement d'un cliché radiographique.

Dans la pratique industrielle, on constate malheureusement que chaque méthode présente des inconvénients associés à l'imprécision de l'un ou de l'autre paramètre de mesure. Pour une production importante, le choix de la méthode de contrôle est difficile. La comparaison qualitative et quantitative des erreurs de mesure doit être faite avec la plus grande attention pour permettre le choix de la méthode offrant le plus de garantie.

DOSAGE PAR MESURE DE LA DENSITÉ DE L'ALLIAGE 2.

2.1. Méthode

Il existe différentes méthodes de mesure de la densité des solides [1]. La méthode de pesée hydrostatique, dans laquelle le volume de l'échantillon est déterminé par la perte de poids dans le liquide, est la plus utilisée. Si on néglige l'influence de la poussée de l'air, la densité est donnée par la formule

$$\rho = \rho_1 \left(\frac{P_a}{P_a - P_1} \right)$$

avec

= densité du solide, ρ

 ρ_1 = densité du liquide utilisé,

 $\mathbf{P}_{\mathbf{a}}$ = poids de l'échantillon dans l'air,

= poids de l'échantillon dans le liquide. $\mathbf{P}_{\mathbf{l}}$

Si l'on connaît la densité, on peut calculer la teneur en uranium grâce à la relation entre ces grandeurs, que l'on peut mettre sous forme de diagramme. Le tracé précis de la courbe est possible si l'on connaît:

- la composition des phases présentes dans l'alliage;

- la densité de chacune de ces phases;

- le volume exact du solide (c'est-à-dire l'absence de porosités),

- la teneur en impuretés;

- la précision de la méthode de mesure des densités.

La sensibilité de la méthode dépend de l'évaluation correcte de chacun de ces points.

2.2. Précautions à prendre

2.2.1. Préparation des échantillons

Les pièces sont nettoyées par l'action des ultrasons dans une petite cuve contenant de l'eau déminéralisée, puis sont rincées à l'acétone, séchées et dégazées sous vide pendant 1/2 h. Les manipulations se font avec des pinces d'acier inoxydable.

2.2.2. Précautions pour la pesée

Les différentes pesées se font au demi-dixième de milligramme, sur une balance dont l'exactitude est vérifiée par plusieurs pesées de poids étalons avant d'effectuer un groupe de mesures. Les trois pesées sont répétéesau moins trois fois. La différence entre les lectures relatives à une même pesée doivent rester inférieures à 0, 2 mg. La pureté de l'eau déminéralisée est surveillée par mesure de la conductibilité électrique et du pH. La température de cette eau est stabilisée à $25^{\circ} \pm 0$, 05° C par l'intermédiaire d'un bain-marie; elle est notée avant et après chaque mesure. Le niveau d'eau est également maintenu constant lorsque la pièce et son panier sont immergés dans l'eau.

Les pièces elles-mêmes sont amenées à la température requise grâce à un séjour de quelques minutes dans un bain d'eau déminéralisée à 25,5°C. Le mouillage des échantillons est obtenu par dégazage sous vide des pièces placées dans le bain d'eau déminéralisée. Les pièces sont agitées pendant ce dégazage.

Le bain est ensuite réchauffé et maintenu à 25°C afin d'amener les pièces exactement à cette température avant pesée hydrostatique dans le bain thermostatisé.

Cette méthode ne nécessite pas d'étalon, mais on évite les erreurs systématiques en vérifiant chaque groupe de mesures par la détermination de la densité d'une pièce de référence. On s'assure que la différence entre cette densité et les déterminations antérieures ne dépasse pas $0,003 \text{ g/cm}^3$.

2.2.3. Expression analytique de la courbe «teneur en uranium en fonction de la densité»

Pour un alliage binaire A-B, les calculs d'ARONIN et KLEIN [2] conduisent aux expressions suivantes. Si A et B représentent les éléments d'alliage, α et β les phases en présence, x la teneur en poids de B, ρ la densité, V le volume total et M la masse totale, la composition de l'alliage en fonction des densités des phases intéressées et de la densité de l'alliage est

$$\mathbf{x} = \frac{\rho_{\beta} \mathbf{x}_{\beta} - \rho_{\alpha} \mathbf{x}_{\alpha}}{(\rho_{\beta} - \rho_{\alpha})} - \frac{\rho_{\alpha} \rho_{\beta} (\mathbf{x}_{\beta} - \mathbf{x}_{\alpha})}{\rho(\rho_{\beta} - \rho_{\alpha})}.$$

Cette expression est une hyperbole de la forme $x(\rho) = C_1 - C_2 / \rho$, ρ étant la densité de l'échantillon.



Figure 1 Diagramme de phase Al-U.

Dans le cas de l'alliage uranium-aluminium (fig.1), la phase A (aluminium) n'est pratiquement pas soluble dans la phase B (uranium). Dès lors $x_{\alpha} = 0$ et l'expression se réduit à

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_{\beta} \frac{\rho_{\beta}}{\rho} \frac{(\rho - \rho_{\alpha})}{(\rho_{\beta} - \rho_{\alpha})},$$

où x_β est la teneur en uranium de la phase U-A1 4.

En y substituant les valeurs numériques connues :

- Densité de l'aluminium à 99, 9% de pureté $\rho_{\alpha} = 2,700 \text{ g/cm}^3$. Pour le présent calcul, la densité a été choisie à $\rho_{\alpha} = 2,702 \text{ g/cm}^3$. Cette valeur doit être mesurée et corrigée pour chaque fabrication, sur la base des échantillons d'aluminium ayant subi un traitement de mise à forme semblable aux échantillons d'alliage, et contenant les mêmes impuretés. La valeur choisie comme la plus probable tient compte, en outre, de la teneur en impuretés de cet aluminium et de l'écart entre les teneurs en uranium mesurées par densité et celles trouvées par analyse chimique sur les mêmes plaquettes.
- Densité de la phase U-Al 4 (calculée à partir des paramètres du réseau cristallographique).

 $\rho_8 = 6,061 \text{ g/cm}^3 \text{ pour 'l'uranium naturel,}$

 $\rho_8 = 6,013 \text{ g/cm}^3$ pour l'uranium enrichi à 90%.

• Teneur en uranium dans la phase U-Al 4.

 $x_8 = 0,688$ pour l'uranium naturel.

 $x_{\beta} = 0,686$ pour l'uranium enrichi à 90%.

L'expression devient, dans ces différents cas:

pour l'uranium naturel et l'aluminium d'au moins 99, 9% de pureté,

x = 1, 2408
$$-\frac{3,3502}{\rho}$$
 (courbe a, fig. 2);

toujours avec l'uranium naturel, mais avec l'aluminium à 2,702 g/cm³,

$$x = 1,2416 - \frac{3,3549}{\rho}$$
 (courbe b, fig. 2);

pour l'uranium enrichi à 90% allié avec de l'aluminium à 2,702 g/cm³, x = 1.2451 $-\frac{3,3643}{2}$ (courbe c. fig.2).

$$= 1, 2451 - \frac{\rho}{\rho}$$
 (courbe c, fig. 2)

Pour des enrichissements intermédiaires, ARONIN et KLEIN [2] citent la formule suivante, où f représente le facteur d'enrichissement:

$$x \approx \frac{(238, 12 - 3, 01 \text{ f})(1/\rho_{\alpha} - 1/\rho)}{(71, 08 - 1, 11 \text{ f})}.$$

2.3. Evaluation des erreurs

2.3.1. Composition des phases

Le diagramme binaire aluminium-uranium (fig.1) indique la présence de deux phases dans toute la région de 0 à 68,8% d'uranium : la phase aluminium et la phase U-Al 4.



Figure 2

Teneur en uranium de l'alliage Al-U en fonction de sa densité.

J. GÉRARD et L. VAN HOVE

On note que la formation des cristaux d'U-Al 4, durant le refroidissement lent de l'alliage, se fait aux dépens d'une réaction péritectique de la phase liquide avec des cristaux d'U-Al 3. La présence d'impuretés est susceptible de retarder cette réaction et de provoquer des précipitations d'U-Al 3 dans l'alliage.

2.3.2. Densité des phases

Pour évaluer l'erreur maximale, on a considéré initialement que la densité de l'aluminium était comprise entre 2,698 et 2,708. De nombreuses mesures ont cependant indiqué que cette densité variait tout au plus de la moitié de cet écart. L'évaluation de cette caractéristique est faite comme indiqué plus haut.

La densité de la phase U-Al 4 a été déduite des paramètres du réseau cristallographique par BORIE [3], en supposant une phase de composition stoéchiométrique. Cependant Borie a mesuré après séparations chimiques des valeurs de la densité d'U-Al 4 égales à $\rho_{B} = 5, 7\pm0, 3$ g/cm³ au lieu de 6,06. Dans le tableau I, on notera que cette incertitude sur la densité de

TABLEAU I

Facteur	Correction positive (%)	Correction négative (%)
1. Densité de l'aluminium	0, 35	0,40
2. Densité de l'U-Al 4	1, 12	-
3. Porosités	0,41	-
4. Présence d'U-Al 3		0,20
5. Présence d'impuretés	-	0,50
6. Mesure de la densité	0, 20	0,20
Corrections maximales	+ 2, 08	- 1, 30

VALEURS RELATIVES MAXIMALES DES CORRECTIONS POSITIVES ET NÉGATIVES (ALLIAGE A 24%)

Ces erreurs sont fortement réduites dans la pratique.

D'une part les corrections relatives aux points 1. à 5. peuvent être calculées avec plus de précision. D'autre part, l'erreur de pesée la plus probable est moindre. Dans la pratique, l'erreur totale est estimée à $\pm 0,70\%$ relatif.

Des analyses chimiques ont confirmé cette évaluation (voir tableau II).

Teneur en uranium-235

Il faut ajouter aux chiffres précédents l'erreur relative de la détermination de la teneur isotopique, qui est de \pm 0,05% pour l'uranium enrichi à 90% (suivant USAEC). Toutefois, pour une fourniture composée de plusieurs lots dont on ne connaît pas l'analyse isotopique individuelle, l'écart relatif peut atteindre \pm 0, 15%.

Dans le cas où l'identification des lots a été conservée, on estime l'erreur globale $a \pm 0,75\%$.

l'U-Al 4 se marque sur la valeur de la teneur en uranium trouvée comme une correction maximale de 1,12% relatif.

La correction due à la présence éventuelle de la phase U-Al 3 est relativement faible. En effet, même si tout l'uranium était présent sous cette phase, la teneur en uranium calculée ne serait trop haute que d'environ 0, 21% relatif.

2.3.3. Correction due aux porosités

Si l'alliage contient des porosités, le dosage en uranium est d'autant plus faux que les vides internes sont plus importants. En pratique, la méthode n'est précise qu'avec des pièces saines. Des examens métallographiques approfondis ont montré que l'erreur relative reste dans des limites acceptables si les porosités sont en dessous de la limite de détection d'une radiographie ou d'un examen par ultrasons. Pour une série d'échantillons, on a mesuré le volume des vides non détectés et on a calculé que la correction était inférieure à 0, 41% relatif (voir tableau I). Lorsque la radiographie et l'examen ultrasonique révèlent des porosités la correction devient importante et rend incertaine l'application de la méthode.

2.3.4. Correction due aux impuretés

Le carbone est la principale impureté de l'uranium. Les carbures peuvent se présenter sous différentes phases: UC, U_2C_3 , UC_2 . En supposant 300 ppm de carbone, sous la phase de monocarbure, le chiffre calculé de la teneur en uranium sera plus élevé que la vraie valeur de 0,02% relatif. L'erreur serait moins grande encore si le carbone se trouvait sous une autre phase.

Les autres impuretés de l'uranium introduisent une erreur inférieure à 0,08%.

En ce qui concerne les impuretés présentes dans l'aluminium, un calcul exact de la correction n'est possible que si l'on connaît les teneurs des impuretés présentes, grâce à une analyse chimique.

Pour un métal à 99, 5% de pureté, si l'on suppose que le complément est composé exclusivement des impuretés les plus lourdes, on peut calculer que la correction serait de 0, 91% relatif. En fait, ce cas est hypothétique et pour les produits habituels (aluminium A5 ou 1100) la correction est plus petite de l'ordre de 0, 40% relatif. Pour un alliage à 24% d'uranium la teneur réelle en uranium sera donc environ 0, 50% plus basse que la teneur calculée.

2.3.5. Erreurs de mesure

L'erreur de lecture du poids est celle d'une balance analytique, 0, 05 mg. Les erreurs systématiques de pesée ne peuvent entrer en ligne de compte. On les évite en suivant un mode opératoire très strict relatif aux manipulations de l'échantillon et à son degré de propreté, de même qu'aux conditions physiques des pesées (température, absence de vibrations, stabilité de la balance). Les erreurs accidentelles, ou en d'autres termes, l'exactitude des pesées, introduisent une erreur maximale de 0, 2% relatif sur la teneur en uranium. Dans une pesée hydrostatique, la poussée de l'air tend à fausser légèrement les mesures, et on peut calculer cette correction d'une manière précise.

Le tableau I résume l'importance de toutes ces erreurs et corrections; les chiffres cités résultent de calculs pour un alliage à 24% d'uranium [4].

A titre de vérification, la teneur en uranium de dix échantillons a été déterminée d'une part par calcul à partir de la densité et d'autre part par analyse chimique. Les résultats sont rassemblés dans le tableau II. Les différences de teneurs obtenues par les deux procédés sont au maximum égales à 0,116% absolu ou 0,45% relatif. La différence moyenne est inférieure à 0,05% absolu ou 0,20% relatif. La concordance des résultats montre la bonne précision de la méthode.

3. MESURE DE LA TENEUR EN URANIUM-235 PAR SPECTROMETRIE GAMMA

3.1. Méthode [5]

Le spectre du rayonnement gamma émis par l'uranium est caractérisé principalement par deux pics de 90 keV et 184 keV d'énergie (fig. 3). Le pic de 184 keV est une émission exclusive de l'uranium-235, tandis que le pic de 90 keV est constitué de plusieurs émissions de l'uranium-235 et d'isotopes de la descendance de l'uranium-235 et de l'uranium-238. En utilisant un spectromètre monocanal, il est possible d'isoler le pic d'énergie intéressante et d'évaluer son activité par comparaison avec des étalons. Pour l'uranium enrichi, on préfère isoler et mesurer l'activité du pic de 184 keV, dont l'émission est particulièrement importante, et pour lequel le phénomène d'auto-absorption du rayonnement dans la source est moindre. L'équipement de mesure est constitué d'un photomultiplicateur avec cristal d'iodure de sodium. La chaîne électronique se compose d'une alimentation haute tension stabilisée pour le détecteur et, pour la partie spectrométrique, d'un





Spectre de l'énergie gamma de l'uranium enrichi à 90%.

TABLEAU II

COMPARAISON ENTRE LES TENEURS EN URANIUM CALCULÉES A PARTIR DE LA MESURE DE LA DENSITÉ ET LES TENEURS DÉTERMINÉES PAR ANALYSE CHIMIQUE SUR LES MÊMES ÉCHANTILLONS

Echanti	llons	Analyse	chimique	De	ensité		Différences	
. Num ér o	Poids (g)	Teneur absolue en uranium TA (%)	Poids d'uranium PA (g)	Teneur absolue en uranium TD (%)	Poids d'uranium PD (g)	TA-TD (%)	PA-PD (g)	(PA - PD) PA 100
24/1	21, 102	23, 83	5,029	23, 93	. 5, 050	-0, 10	-10,021	-0, 42
32/1	20, 517	22, 98	4, 715	23,03	4, 725	-0,05	- 0,010	-0,21
53/2	13, 420	22, 74	3,052	22, 83	3,064	-0,09	- 0,012	-0, 39
54/2	13, 219	22, 62	2, 990	22, 69	2, 999	-0,07	- 0,009	-0, 31
21/3	13, 696	23, 716	3, 248	23, 69	3, 245	+0,026	+ 0,003	+0,09
28/3	13, 810	23, 256	3, 212	23, 25	3,211	+0,006	+ 0,001	+0, 03
53/3	13, 653	22, 772	3, 109	22, 88	3, 124	-0, 102	- 0,015	-0, 48
54/3	13, 413	22, 730	3, 049	22, 83	3, 062	-0,100	- 0,013	-0, 43
-	56, 766	26, 146	14, 842	26,03	14, 776	+0,116	+ 0,066	+0, 44
-	56, 766	26, 09	14, 810	26, 03	14, 776	+0,06	+ 0,034	+0, 23
						Moyenne		Моуеппе
						-0, 030		-0, 14

DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN URANIUM

45

discriminateur d'amplitude monocanal suivi d'une échelle de comptage. Le discriminateur réalise l'isolement d'un pic en ne transmettant que les impulsions dont l'énergie est comprise entre E et $E + \Delta E$ et centrée sur le pic de 184 keV. ΔE est souvent appelée «largeur de fenêtre». La teneur en uranium-235 est calculée par proportionnalité entre les activités de l'échantillon et de l'étalon, dans les mêmes conditions de mesure. Le comptage gamma est affecté d'une erreur due à guatre causes principales [6]:

- Le phénomène de désintégration est une variable aléatoire;
- La direction de propagation du rayonnement est indéterminée;
- Les interactions de la matière sensible du détecteur et des radiations qui l'atteignent sont de nature statistique;
- Les paramètres de la chaîne de mesure électronique peuvent varier. Chacun de ces facteurs va être examiné plus en détail.

3.2. Mode opératoire

3.2.1. Préparation des étalons

Ce point sera décrit d'une façon plus détaillée dans l'annexe A.

3.2.2. <u>Méthode de mesure</u>

On met le spectromètre en ordre de marche en suivant point par point une liste de réglage de la haute tension, du gain de l'amplificateur et des paramètres du discriminateur (position et largeur de la fenêtre du canal analyseur).

Une fois par jour, on relève le spectre de l'énergie de 184 keV de l'uranium-235 aux fins de centrer la fenêtre du discriminateur avec une erreur maximale de ± 6 KeV.

Toutes les quatre ou cinq mesures, on fait un comptage sur les deux faces de l'étalon de même forme que l'échantillon. On compte pendant le temps nécessaire pour intégrer 100000 coups avec une largeur de fenêtre de 10 V. On note le temps de comptage correspondant à la moyenne de deux mesures. On compte et on note également le bruit de fond (background) pendant le même temps, de façon à corriger les résultats de mesure sur l'étalon aussi bien que sur l'échantillon.

Le comptage sur échantillon se fait dans les mêmes conditions que la mesure de l'étalon de façon qu'on connaisse, pour chaque face, le temps nécessaire pour intégrer 100 000 coups. La moyenne de ces deux comptages, moins le background, est comparée aux comptages sur étalons (voir annexe B). On insiste sur les précautions à prendre pour toujours conserver la même géométrie de mesure (positionnement des échantillons à distance constante du détecteur) et pour éviter l'influence des rayonnements parasites (château de plomb de 4 cm d'épaisseur).

3.3. Evaluation des erreurs

3.3.1. Lois de la désintégration radioactive et de l'auto-absorption

Si l'on applique les lois de la statistique mathématique, il est bien connu que le taux de comptage répond à une distribution normale (courbe de Gauss)

DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN URANIUM

dont l'écart quadratique moyen vaut

$$\sigma = \sqrt{n}$$
 ou, en valeur relative $\sigma = 1/\sqrt{n}$,

 \bar{n} étant la valeur moyenne du nombre de coups enregistrés pendant un temps déterminé. La précision sera d'autant meilleure que \bar{n} est plus grand. On se fixe $\bar{n} = 100\,000$ coups, de sorte qu'il y a 95% de chances d'avoir une erreur inférieure à 2 σ ou à $\pm 0,6\%$ relatif. Un autre facteur important est l'auto-absorption du rayonnement dans l'échantillon lui-même. La source est en effet constituée d'alliage d'uranium qui est un absorbant d'autant meilleur que son épaisseur augmente. L'expression de ce phénomène est

$$N = N_0 \frac{1 - \exp(-\mu x)}{\mu x},$$

où N est le nombre de désintégrations dont le rayonnement s'échappe de l'échantillon et est susceptible d'être mesuré, N₀ est le nombre de désintégrations directement proportionnel à la quantité d'uranium-235 présente dans l'échantillon, μ est le coefficient linéaire d'absorption de l'alliage, x est son épaisseur.

Dans la pratique, on élimine presque complètement cette possibilité d'erreur par la comparaison avec un étalon de forme identique et de teneur voisine et par le comptage sur les deux faces de l'échantillon, dont la moyenne constitue la mesure. Ce raisonnement suppose que l'alliage est homogène, ce qui n'est pas toujours le cas. Le cas le plus défavorable est celui d'une hétérogénéité en surface ou juste à la demi-épaisseur.

La figure 4 représente le diagramme de l'auto-absorption en fonction du poids par unité de surface de l'échantillon. Dans ce cas particulier, on remarque qu'une hétérogénéité de surface introduirait une erreur importante si l'on n'effectuait pas une deuxième mesure par retournement. Si l'on fait cette double mesure, la moyenne arithmétique des deux courbes d'auto-absorption n'est généralement pas une ligne horizontale, mais une







courbe concave. Si les hétérogénéités sont réparties uniformément dans l'alliage, il n'y a pas de différence significative avec les résultats de comptage sur une pièce homogène. Le cas le plus défavorable est celui d'une ségrégation systématique au centre de l'échantillon.

Cette possibilité existe réellement. Des examens métallographiques et des radiographies ont révélé assez fréquemment ce défaut dans l'alliage laminé, très rarement dans un produit filé par extrusion. Lorsqu'elle existe, on a constaté qu'une augmentation locale de la teneur en uranium se faisait aux dépens de la zone immédiatement voisine.

Ces examens ont permis d'évaluer l'erreur induite dans quelques cas théoriques extrêmes. Si, par exemple, la zone centrale de l'échantillon contenait 50% du poids d'uranium sous forme de métal pur, les zones intermédiaires étaient composées d'aluminium pur et les surfaces extérieures concentraient le reste de l'uranium, l'erreur de comptage entre l'étalon et cet échantillon hypothétique resterait, à teneur égale, inférieure, à ± 0 , 05% relatif.

Les différences d'épaisseur de l'échantillon peuvent également influencer la mesure. Cependant, grâce aux deux mesures par retournement, la courbe c de la figure 4, qui représente la moyenne de ces mesures, est presque horizontale. L'erreur étant proportionnelle à la pente maximale de cette courbe, on voit qu'elle est minime. Dans le cas particulier de cette figure, une variation de $\pm 3\%$ de l'épaisseur introduit une erreur de comptage inférieure à $\pm 0,01\%$ relatif.

Jusqu'ici l'examen des causes d'erreurs dues à l'auto-absorption suppose que l'échantillon a la même teneur que l'étalon. Il faudrait donc posséder une série d'étalons pour établir le tracé de la courbe «teneur en uranium en fonction de l'activité gamma». Les tolérances permises par les spécifications étant généralement étroites, deux étalons de valeurs extrêmes suffisent pour tracer la droite remplaçant la portion de courbe intéressante. En raison de l'auto-absorption, cette droite traduit néanmoins la nonproportionnalité entre la teneur en uranium et l'activité. En fait, il est même possible de se servir d'un seul étalon si

- la teneur de l'étalon est très voisine de la valeur nominale spécifiée,
- cette teneur est vérifiée par analyse chimique d'une façon aussi précise que possible,
- on tient compte du coefficient angulaire de la tangente (pente) de la courbe, que l'on peut calculer d'après les valeurs de l'auto-absorption.

Le détail de la méthode est donné dans les annexes B et C. Cette façon de procéder supprime pratiquement l'erreur due à l'auto-absorption, puisqu'on en tient compte dans le calcul; elle réduit sensiblement les frais dus à la préparation des étalons. L'erreur relative maximale qui correspond à la différence entre la courbe réelle et la droite tracée est estimée à \pm 0, 10%.

Au total, le phénomène d'auto-absorption peut être l'origine d'une erreur relative d'environ \pm 0, 15%.

3.3.2. Propagation du rayonnement

Cette seconde cause de fluctuation des résultats des mesures est de nature géométrique. En effet, la pièce «voit» le détecteur sous un certain

DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN URANIUM

angle solide et la désintégration ne sera détectée que si la radiation émise atteint la surface sensible du détecteur. Cette probabilité de détection, souvent appelée rendement géométrique, influence fortement le résultat de la mesure. Lorsqu'on effectue une mesure par rapport à un étalon, il est essentiel de placer l'étalon et l'échantillon dans les mêmes conditions géométriques de détection. L'erreur due à ce facteur est alors proportionnelle aux variations de surface, c'est-à-dire aux tolérances dimensionnelles, et elle est facile à évaluer. Dans l'exemple du tableau III elle vaut $\pm 0, 4\%$ relatif.

TABLEAU III

Facteurs	Erreurs (%)		
Erreur statistique de comptage	<u>+</u> 0, 60 (moyenne)		
Auto-absorption et hétérogénéité de l'alliage	± 0, 15 (maximum)		
Tolérances dimensionnelles	<u>+</u> 0, 40 (maximum)		
Haute tension	<u>+</u> 0, 45 (moyenne)		
Erreur relative totale	± 1, 55		
Erreur relative la plus probable	± 0, 60		

MESURE DE LA TENEUR EN URANIUM-235 PAR SPECTROMÉTRIE GAMMA

3.3.3. Lois d'interaction du rayonnement avec la matière

On sait que les rayons gamma ne sont pas ionisants par eux-mêmes: seuls peuvent être enregistrés les électrons qu'ils arrachent aux atomes du milieu scintillant lors de leurs interactions avec ceux-ci. Trois processus d'interaction sont possibles si bien que l'enregistrement d'un rayonnement gamma monochromatique n'est pas composé d'une simple crête, mais présente un profil compliqué qui s'enchevêtre d'ailleurs avec les profils correspondant à des rayonnements d'énergies différentes. Dans le cas de l'uranium, heureusement, le pic photoélectrique à 184 keV est suffisamment distinct pour pouvoir servir à l'identification et au dosage. D'ailleurs toutes causes d'erreurs disparaissent si l'on effectue des mesures par comparaison avec des étalons. On signale parfois [7] la possibilité d'une erreur si l'uranium enrichi a déjà été irradié et contient encore, malgré le retraitement, quelques traces de produits de fission. En fait, cependant, le rayonnement gamma des impuretés ne peut interférer que par une composante due à l'effet Compton; outre l'activité réduite de cette composante, on a constaté que la durée de vie des impuretés gênantes était très courte. En pratique donc, cette cause d'erreur ne doit pas être prise en considération.

3.3.4. Paramètres de la chaîne de mesure électronique [8]

3.3.4.1. Haute tension du tube photomultiplicateur

Elle règle le gain total du tube par modification du champ électrique responsable de l'accélération des électrons. Elle agit donc sur l'amplitude de l'impulsion de sortie et, finalement, sur la position du spectre d'énergie. Si V est la différence de potentiel entre dynodes et n le nombre de celles-ci, le gain du tube photomultiplicateur vaut (k est un coefficient de proportionnalité)

$$G = (kV)^n$$
.

Si n = 10, la différentiation donne

$$\frac{\mathrm{dG}}{\mathrm{G}} = 10 \frac{\mathrm{dV}}{\mathrm{V}} \; .$$

Cela signifie que 1% de variation de la tension appliquée au tube entraîne une variation de 10% du gain. Pour pouvoir faire des mesures stables et répétitives, il faut une haute tension extrêmement bien stabilisée, de l'ordre de 0, 1‰ pour \pm 10% de variation du secteur. C'est cette source d'erreur possible qui impose la mesure fréquente de l'étalon, toutes les quatre ou cinq mesures. On limite ainsi l'erreur relative à \pm 0, 45% sur une installation normalement stabilisée. Ce chiffre résulte d'une vérification sur 200 mesures consécutives. Avec une meilleure stabilisation, l'erreur peut être réduite sensiblement.

3.3.4.2. Gain de l'amplificateur linéaire

Cette variable a également une influence sur l'amplitude des impulsions de sortie. La non-linéarité peut donc introduire une erreur. Cependant puisqu'il s'agit d'un spectromètre monocanal, l'amplificateur n'est utilisé que dans une zone très étroite de gain, où il n'y a pas de difficulté à conserver la linéarité.

3.3.4.3. Constante de différentiation

L'impulsion de sortie du photomultiplicateur est caractérisée par un temps de montée très court (fig. 5) suivi d'une décroissance exponentielle plus lente. Si une seconde impulsion se présente avant que l'amplitude de la première n'ait suffisamment diminué, il y aura superposition des amplitudes. Le spectre gamma des énergies, qui se fait par triage de l'amplitude des impulsions, sera faussé. Cette erreur s'aggrave évidemment avec la fréquence d'apparition des impulsions, autrement dit, le taux de comptage. Pour pallier cet inconvénient, on différencie l'impulsion avant de la transmettre au discriminateur. Cette opération a pour but de forcer l'impulsion à décroître plus rapidement et, par conséquent, d'augmenter le taux de comptage permis. Ce paramètre n'introduit donc aucune erreur si l'on ne dépasse pas le taux de comptage risquant de créer une superposition des impulsions. Sinon, on

4*

50

DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN URANIUM



Forme de l'impulsion de sortie du photomultiplicateur

doit faire intervenir une correction du temps mort du discriminateur. En pratique, on fixe cette constante de différentiation à 1 μ s, et la limite du taux de comptage vaut approximativement 100 000 coups/s. Il faut relever ici que ce taux de comptage limité peut ne pas correspondre à celui des impulsions comptées à l'intérieur de la fenêtre d'analyse, mais bien à celui de toutes les impulsions d'amplitude plus élevée que le seuil de cette fenêtre.

3.3.4.4. Position et largeur de la fenêtre d'analyse

Il faut se centrer au pic de 184 keV, en ne perdant pas de vue que la principale fonction de la fenêtre d'analyse est de <u>rejeter</u> des impulsions, pour n'en conserver qu'une certaine fraction intéressante. Il ne faut toutefois pas éliminer trop d'impulsions, car en diminuant le taux de comptage, on augmente l'incertitude statistique ou la durée de la mesure.

Le centrage au pic doit être aussi parfait que possible. D'une part, on se place au point où le taux de comptage est maximal. D'autre part, dans ces conditions, un léger glissement de la fenêtre dû aux fluctuations du gain ne perturbera pas trop la mesure, car la raie photoélectrique est pratiquement symétrique par rapport à son sommet.

Le bruit de fond intervient également dans le choix de la position de la fenêtre; il a trois causes principales:

- L'action des sources parasites présentes dans le local de mesure, la radioactivité naturelle de certains constituants du détecteur et du blindage et le rayonnement cosmique; on atténue cette action par un blindage approprié du détecteur;

- Le bruit propre du photomultiplicateur, par effet thermoélectrique; ces impulsions parasites, très riches en composantes de faible énergie, augmentent avec la température ambiante; il est donc intéressant de maintenir le tube à une température constante voisine de 10° (circulation d'eau courante);

- Le souffle de l'électronique, qui donne également des impulsions de faible amplitude.

On remarque sur la figure 6 que les composantes à basse énergie prédominent dans le spectre du bruit de fond. Le seuil de la fenêtre d'analyse





Influence du bruit de fond

ne doit donc pas être placé trop bas; on réduit ainsi la contribution du bruit de fond.

La largeur de la fenêtre d'analyse doit être aussi grande que possible, puisque le taux de comptage obtenu est proportionnel à l'aire du spectre interceptée par cette fenêtre. Il est clair cependant (fig.6) que cette augmentation du taux de comptage ne se fera pas proportionnellement à l'accroissement de la largeur de la fenêtre, puisque le pic a lui-même une largeur bien définie. Le rapport de l'aire hachée s du signal (BFGC) à celle du bruit (BDEC) vaut, pour l'exemple représenté à la figure 6,

$$s/b = 5$$
.

Si on élargit la fenêtre de manière à encadrer l'aire délimitée par les lignes AA', on obtient un rapport signal-bruit

s/b = 4.

Il y a donc un compromis à trouver entre ce rapport signal-bruit et le taux de comptage, lesquels varient en sens opposé lorsqu'on modifie la largeur de la fenêtre. On peut montrer par des considérations statistiques [7] que la meilleure ouverture de fenêtre est celle qui rend le rapport

$$r = \frac{R_s^2}{R_b} = \frac{(taux \ de \ comptage \ de \ la \ source \ seule)^2}{taux \ de \ comptage \ du \ au \ bruit}$$

maximal.

Compte tenu des possibilités du spectromètre, on utilise une largeur de fenêtre de 10 V, ce qui correspond à environ 60 keV. Ainsi qu'on l'a vu au paragraphe 3.3.1., l'erreur statistique est inférieure à 0,2%. Le tableau III résume toutes ces erreurs.

Lorsque l'alimentation du détecteur est bien stabilisée et que les dimensions des échantillons sont connues, une évaluation plus précise permet d'apprécier l'erreur relative la plus probable à \pm 0, 60%.

4. DOSAGE PAR ANALYSE CHIMIQUE DE L'ALLIAGE

4.1. Méthode

Les méthodes de chimie analytique sont applicables pour autant que les techniques soient très soignées. L'analyse chimique est évidemment destructive et elle n'est citée ici que dans la mesure où elle permet l'étalonnage des autres méthodes.

4.2. Précautions

Des précautions opératoires sont nécessaires pour éliminer les erreurs dues aux hétérogénéités et aux impuretés chimiques de l'alliage et pour tenir compte de la présence des différents isotopes de l'uranium, dont il faut connaître la proportion pour le calcul exact de la teneur en uranium-235.

En premier lieu, il faut dissoudre des échantillons complets pour l'analyse, car des prélèvements de fragments risqueraient d'introduire des erreurs dues aux ségrégations présentes dans l'échantillon.

Certaines impuretés, dont le fer, troublent l'analyse. Cette impureté, en effet, se retrouve avec l'uranium dans la séparation classique des constituants de la solution. Pour en tenir compte, on utilise deux méthodes:

- a) On peut traiter la plaquette comme si elle ne contenait pas de fer, et en déterminer la «teneur en uranium»; on analyse ensuite la teneur en fer de la solution et on corrige par calcul les résultats précédemment obtenus.
- b) On peut également séparer chimiquement le fer de la solution, puis faire l'analyse de la teneur en uranium de la solution épurée.

4.3. Précision

Des analyses effectuées sur une même solution de départ ainsi que sur plusieurs portions d'échantillons homogènes ont montré que la variation maximale des résultats reste inférieure à $\pm 0,25\%$ relatif. Des analyses comparatives entre laboratoires différents ont confirmé ces résultats.

5. CLICHÉ RADIOGRAPHIQUE

5.1. Méthode

Elle consiste à radiographier l'échantillon en même temps que deux étalons représentant respectivement les limites supérieure et intérieure de la teneur en uranium. Par examen visuel ou densitométrique du cliché, on détermine la teneur de l'échantillon par comparaison entre les noircissements des zones du cliché.

5.2. Précautions

Les conditions de prise du cliché doivent être fixées de façon que le contraste soit aussi bon que possible (densité 1, 5 en moyenne pour l'examen visuel) et qu'il n'y ait pas de voile de rayonnement diffusé sur le film. Le développement doit être très soigné et réalisé dans des conditions reproductibles.

5.3. Précision

Le plus petit contraste perceptible sur un film correspond à 2% de l'épaisseur de matière traversée. Cette précision est peu intéressante et elle n'offre pas la possibilité de résumer en un chiffre ou en une évaluation unique la valeur moyenne de la teneur d'un échantillon contenant des porosités ou des ségrégations. Cette méthode n'est citée que parce qu'elle permet de se rendre compte facilement de l'homogénéité de l'alliage et, partant, peut-être utilisée pour faire le choix des étalons de mesure parmi des échantillons les plus homogènes.

6. CHOIX D'UNE MÉTHODE INDUSTRIELLE

Le tableau IV résume les considérations précédentes et présente quelques autres méthodes avec leurs inconvénients et leurs avantages [9]. Pour le choix d'un contrôle non destructif au rythme industriel, la comparaison et la discussion se limitent à la spectrométrie gamma et la mesure de densité.

Précision

La précision des deux méthodes est très comparable.

Prix

Une installation de spectrométrie coûte près du double de l'installation nécessaire à la mesure des densités, mais exige un personnel moins qualifié.

Rapidité

Une installation de spectrométrie se prête à une automatisation. Les mesures par densité doivent être effectuées manuellement. Même sans automatisation, les mesures par comptage γ sont plus rapides que celles de la densité.

Etalons

Le comptage γ nécessite la présence d'étalons connus pour chaque forme d'échantillon. Un étalonnage précis est nécessaire (voir annexe A); il doit faire intervenir toutes les ressources des méthodes simples. Les mesures par densité ne nécessitent aucun étalon.

Forme

Les mesures par densité sont applicables à des formes quelconques. Les mesures par comptage γ sont applicables à des pièces de formes simples.

DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN URANIUM

TABLEAU IV

MÉTHODES POUR LA DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN URANIUM

Méthode	Précision relative (%)	Avantages	Inconvénients
Spectrométrie de masse	<u>+</u> 0,05	Haute précision	Coût de l'analyse
Spectroscopie d'émission	2 2 4	Equipement assez répandu	Coût de l'analyse
Activation par neutrons	±1	Bonne précision	Limite à un enrichissement de 5% Interférence avec les impuretés
Absorption neutronique	± 1	Bonne précision Non destructif	Pour enrichissement supérieur à 80% Interférence avec les impuretés
Réactivité	± 1	Bonne précision Non destructif	Réacteur puissance zéro nécessaire Etalonnage complexe
Spectrométrie alpha	± 1	Non destructif	Etalonnage complexe
Spectrométrie gamma	± 0,6	Non destructif Bonne précision Rapidité de mesure	Etalonnage précis nécessaire Limité aux formes géometriques simples
Densité	± 0,7	Non destructif Bonne précision Facilité de mise en oeuvre	Personnel qualifié

7. CONCLUSION

Le choix entre les méthodes de détermination de la teneur en uranium par comptage γ et par mesure de la densité doit être examiné dans chaque cas particulier en fonction des cinq facteurs cités.

Dans certains cas la mesure de la densité peut être imposée: manque d'étalons pour le comptage γ ou forme compliquée des pièces. D'une manière générale, le comptage γ est un procédé de contrôle de production, la mesure de la densité est une méthode rapide de laboratoire.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Direction de la S.A. Métallurgie et mécanique nucléaires d'avoir autorisé la publication de ces résultats, M. Andrien et van Craenendonck de leur collaboration à ce travail, ainsi que le laboratoire de la S.A. Métallurgie Hoboken, qui a effectué les analyses chimiques.

J. GÉRARD et L. VAN HOVE

ANNEXE A

ÉTABLISSEMENT D'ÉTALONS POUR LA SPECTROMÉTRIE GAMMA [10]

1. Dans un groupe d'échantillons de dimensions identiques et provenant d'une même coulée, on choisit ceux dont la teneur en uranium mesurée par densité se rapproche de la valeur nominale spécifiée.

2. On radiographie ces échantillons, et on en conserve deux dont l'homogénéité est aussi parfaite que possible et dont les teneurs trouvées ci-dessus sont identiques à 0,3% près au maximum.

3. On compare ces deux échantillons par spectrométrie gamma, suivant la méthode décrite au paragraphe 3.2.2., en faisant des mesures sur les deux faces et en intégrant environ 200000 coups. On vérifie que les résultats sont identiques à ± 0 , 3% près au maximum.

4. On fait une analyse chimique par dissolution complète d'un des échantillons par la première méthode citée au paragraphe 4.2., et on calcule la correction due à la teneur en fer. On recommence tout si la teneur en uranium s'écarte de $\pm 1\%$ de la valeur nominale spécifiée.

5. On fait une analyse isotopique sur un prélèvement de la solution pour analyse chimique. L'enrichissement doit être dans les limites de tolérance spécifiées.

6. Grâce aux résultats de 4. et 5. ci-dessus et aux chiffres comparés des résultats du double comptage fait en 3. on détermine avec précision la teneur en uranium-235 de l'étalon.

ANNEXE B

CALCUL DE LA TENEUR EN URANIUM-235 DES ÉCHANTILLONS

En examinant les erreurs introduites par le phénomène d'auto-absorption dans l'alliage (paragraphe 3.3.1.) on a vu qu'il était préférable de remplacer la portion intéressante de la courbe «teneur en uranium-235 en fonction de l'activité gamma» par une droite représentant la pente de la courbe.

Pour un échantillon x quelconque la teneur en uranium-235 est donnée par l'équation

$$U_x^{235} = U_s^{235} \left(1 + b \frac{C_x - C_s}{C_s - C_b} \right).$$

 U_s^{235} = teneur en uranium-235 de l'étalon de mêmes dimensions;

C_x = nombre de coups enregistrés sur l'échantillon (moyenne des deux comptages recto-verso);

C_s = nombre de coups enregistrés sur l'étalon s (moyenne recto-verso);

DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN URANIUM

- C_b = nombre de coups correspondant au bruit de fond;
- b = coefficient angulaire relatif de la tangente à la courbe.

On a
$$b = \frac{\Delta U/U}{\Delta \gamma/\gamma} = \frac{1-a}{a \ln 1/a}$$

a = coefficient d'auto-absorption du rayonnement gamma.

ANNEXE C

DÉTERMINATION DU COEFFICIENT D'AUTO-ABSORPTION

Ce coefficient peut être mesuré de la façon suivante, d'après la méthode générale décrite au paragraphe 3.2.2. (Les échantillons doivent toujours être orientés du même côté vers le détecteur):

- a) On compte sur deux échantillons superposés, l'étalon s et un autre y de même dimensions et de teneur très voisine. L'étalon est placé entre y et le détecteur. On obtient C_{s+y} .
- b) On compte sur l'étalon placé exactement comme en a). On obtient Cs.
- c) On compte sur l'échantillon y seul, placé exactement comme en a). On obtient C_v .
- d) On compte le bruit de fond Cb.

Tous les comptages sont répétés pour intégrer environ 100000 coups et obtenir une précision relative de $\pm 1, 4\%$.

Le coefficient d'auto-absorption vaut

$$a = \frac{C_s + y - C_s}{C_y - C_b}.$$

RÉFÉRENCES

- [1] HIDNERT, F. and PEFFER, E.L., National Bureau of Standards, Circular 487 (March 15, 1950).
- [2] ARONIN, L.R. and KLEIN, J.L., Use of a Density Method as a Sensitive Absolute Measure of Alloy Composition and its Application to the Aluminium-Uranium System, NMI - 1118 (1954).
- [3] BORIE, B.S., J. Metals 3 (1951) 800.
- [4] PLANQUART, J. et al., Fuel Elements in the Form of Concentric Tube Fuel Elements, Proc. 3rd UN Int. Conf. PUAE, P716 (1964).
- [5] MCGONNAGLE, W.J. and PERRY, R.B., Analysis of Fuel Element Core Blanks for Argonne Low Power Reactor by Gamma Counting, ANL-5944 (1959).
- [6] LAGASSE, A., Revue M. B. L. E. (Manufacture belge de lampes et de matériel électronique) 3 (1960) 4; idem 4 (1961) 1.
- [7] JUDD, W.C. and LEBOEUF, M.B., Determination of U²³⁵ Homogeneity and Loading Using Scintillation Spectrometry, TID - 7560 (1958).
- [8] SPECTROMÉTRIE, Rapport Technique ACEC (Ateliers électriques de construction de Charleroi) nº 102, non publié.
- MEINZ, C.A. and LA MONT, B.D., Determination of U²³⁵ in Low-Enriched Non Irradiated Uranium Dioxyde Pellets by Gamma-Ray Spectrometry, WAPD 1544 (1960).
- [10] STIENNON, G., BINARD, L. et de MEESTER, P., Technique de fabrication d'étalons pour la spectrométrie gamma des plaquettes de combustible pour BR-2, Lettre aux auteurs, non publiée, CEN, Mol (août 1963).

J. GÉRARD et L. VAN HOVE

DISCUSSION

P. de MEESTER: What is the relative influence of background noise on your counting?

J. GÉRARD: Variations connected with the electronic measuring circuit can result in an error of the order of 0.4%. The relative influence of the background noise is about one quarter or one fifth of this value. The background noise can be substantially reduced by providing the detector with thermostatic protection against the effect of temperature changes and by removing the parasitic sources which are often present in industrial workshops.

P. de MEESTER: Have you studied the counting characteristics, in particular the self-absorption, for energies other than the 184-keV peak, e.g. the 95-keV peak or the integral measurement?

J. GÉRARD: We have always counted on the 184-keV peak since we are usually dealing with 90%-enriched uranium. We think it is preferable to count on the 184-keV peak, except in the case of natural uranium (for which the activity of the 184-keV peak'is low), because the influence of the background noise is greater at 95 keV and because the 95-keV peak can be disturbed by parasitic radiation from uranium daughter products.

J.E. LOVETT: Could you briefly describe the geometry of your equipment, in particular the radiation detector, shielding and sample-to-detector distance.

J. GÉRARD: The detector is a thallium-activated sodium iodide crystal. The shielding is lead, 4 cm in thickness. The distance between sample and detector is of the order of 20 cm.

W. FRANCIS: If I understood your oral presentation correctly, the results you present are applicable to single plates. When one obtains fuel assemblies from a commercial supplier, it is not possible to work with single plates. Have you done any work with assemblies of fuel plates?

J. GERARD: Our paper deals with measuring methods used by the fuel element manufacturer. The measurement is not made on plates or assemblies but on the uranium alloy core, which is generally of simple geometry. We do not think the methods described can be used for a complete assembly. Session II

F

· · · . . .

LIMITATIONS OF Ir¹⁹² AS A RADIOGRAPHIC SOURCE FOR THE CONTROL OF REACTOR PRESSURE-VESSELS

D. HORVAT NUCLEAR INSTITUTE "J. STEFAN" LJUBLJANA, YUGOSLAVIA

Abstract — Résumé — Аннотация — Resumen

LIMITATIONS OF Ir¹⁹² AS A RADIOGRAPHIC SOURCE FOR THE CONTROL OF REACTOR PRESSURE-VESSELS. Published data and the results of our own investigations have shown that the advantage of Ir¹⁹² with regard to the quality of radiographs is obvious when comparing it with Co⁶⁰ even with thicknesses over 80 mm of irradiated steel. The application of Ir¹⁹² in practice is limited by the alternative: either a very long exposure time or a source of very high activity.

Where the exposure (Ci . min) for 1 m of radiographed weld is plotted against the specific activity of the source, diagrams show that, for practically attainable specific activities kilo-curie sources must be used for greater thicknesses. For such sources, self-absorption may become an important factor. An analysis of the influence of self-absorption causing a reduction of the source effectiveness and the filtration effect in the source is made by determining an equivalent increase of thickness of irradiated steel and by calculating the effective linear absorption coefficient as a function of the source dimensions and the thickness of the irradiated steel. Even in cases of relatively large source dimensions the filtration effect does not diminish the effective linear absorption coefficient to such an extent that the advantage in quality against Co⁶⁰ would be lost.

Possibilities of improvement due to a new shape of radiographic sources are discussed. In the case of narrow primary beamsthese new sources give smaller effective dimensions and allow shorter source-to-film distances.

A further advantage of Ir^{192} is obvious from the diagrams of the weight of the exposure equipment for Ir^{192} and Co⁶⁰ taking in account equivalent activities of both sources regarding the same exposure time.

The economic disadvantages, because of the short half-life, of Ir¹⁹² are discussed and a rough economical comparison between Co⁶⁰ and Ir¹⁹² at different extensiveness and densities of the radiographic control is given.

LIMITATIONS DE 192IT EN TANT QUE SOURCE POUR L'EXAMEN RADIOGRAPHIQUE DES CAISSONS ÉTANCHES DE RÉACTEURS. Les données publiées et les résultats des études faites par l'auteur montrent que, pour ce qui est de la qualité des radiographies, ¹⁹²Ir présente un avantage très net sur ⁶⁰Co, même pour des épaisseurs d'acier itradié supérieures à 80 mm. Dans la pratique, l'emploi de ¹⁹²Ir est limité parce qu'il faut un temps d'exposition très long ou une source très intense.

Des diagrammes donnent, en fonction de l'activité spécifique de la source, le temps d'exposition nécessaire pour radiographier une soudure de 10 cm; ces diagrammes montrent que, compte tenu des activités spécifiques que l'on peut obtenir dans la pratique, il faut des sources de l'ordre du kilocurie pour des épaisseurs plus importantes. Pour de telles sources, l'auto-absorption peut devenir un facteur important. On analyse l'influence de l'auto-absorption, qui réduit l'efficacité de la source, et l'effet de filtration dans la source en déterminant l'augmentation correspondante de l'épaisseur d'acier irradié et en calculant le coefficient réel d'absorption linéique en fonction des dimensions de la source et de l'épaisseur d'acier irradié. Même lorsque les dimensions de la source sont relativement importantes, l'effet de filtration ne diminue pas le coefficient réel d'absorption linéique au point de faire disparaître l'avantage de ¹⁹²Ir sur ⁶⁰ Co quant à la qualité de la radiographie.

L'auteur examine les possibilités d'amélioration grâce à une forme nouvelle des sources. Ces nouvelles sources donnent, dans le cas de faisceaux primaires étroits, des dimensions efficaces plus réduites et permettent de diminuer la distance source-film.

Un autre avantage de ¹⁹²Ir ressort nettement des diagrammes donnant le poids des appareils de radiographie avec ¹⁹²Ir et ⁶⁰Co, compte tenu de l'intensité de la source dans chaque cas pour obtenir un même temps d'exposition.

L'auteur discute les désavantages de ¹⁹²Ir sur le plan économique, du fait de sa courte période; sur ce même plan, il compare approximativement ⁶⁰Co et ¹⁹²Ir suivant la sensibilité et la précision désirées lors de l'examen radiographique.

D. HORVAT

НЕДОСТАТКИ ИРИДИЯ-192 В КАЧЕСТВЕ РАДИОГРАФИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗА КОРПУСАМИ РЕАКТОРОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ. Опубликованные данные и результаты наших собственных исследований показали, что преимущество иридия-192 в отношении качества рентгеновских снимков является очевидным по сравнению с кобальтом-60 даже при толщине облучаемой стали свыше 80 мм. Применение иридия-192 на практике ограничивается альтернативой: или требуется очень длительное время облучения или источник очень высокой активности.

Диаграммы, где вычерчено облучение, выраженное в кюри в минуту для одного метра радиографированной сварки в отношении удельной активности источника, показывают, что в отношении практически доступных удельных активностей источники в килокюри приходится использовать для большей толщины. Для таких источников самопоглощение может стать важным фактором. Анализ влияния самопоглощения, вызывающего снижение эффективности источника и эффектов фильтрации в источнике, производится путем определения эквивалентного увеличения толщины облучаемой стали и путем расчета коэффициента эффективного линейного поглощения в качестве функции размеров источника и толщины облучаемой стали. Даже в случаях с размерами сравнительно крупных источников эффект фильтрации не уменьшает коэффициент эффективного линейного поглощения в такой степени, чтобы происходила утеря преимущества в качестве по сравнению с кобальтом-60.

Обсуждаются воэможности улучшения в связи с новой конфигурацией радиографических источников. Эти новые источники дают в случае узких первичных пучков меньшие эффективные размеры и допускают меньшие расстояния между источником и пленкой.

Другое преимущество иридия-192 видно из диаграмм веса оборудования для облучения для иридия-192 и кобальта-60, учитывая эквивалентные активности обоих источников в отношении того же самого времени облучения.

Обсуждается вопрос об экономических недостатках иридия-192 ввиду его короткого периода полураспада, и дается грубое экономическое сравнение эффективности кобальта-60 и иридия-192 при различных диапазонах и плотностях радиографического контроля.

LIMITACIONES DEL ¹⁹²Ir COMO FUENTE RADIOGRAFICA EN EL CONTROL DE RECIPIENTES DE PRESION PARA REACTORES. Los datos publicados en la literatura y los resultados de las investigaciones del autor han puesto de manifiesto las ventajas evidentes que el ¹⁹²Ir presenta sobre el⁵⁰Co en cuanto a la calidad de las radiografías obtenidas, aun con espesores de acero superiores a 80 mm. En la práctica, la aplicación del ¹⁹²Ir está supeditada a la siguiente alternativa: exposición sumamente prolongada, o bien empleo de una fuente de actividad muy elevada.

Si se representa gráficamente la exposición (Ci \times min) correspondiente a 1 m de soldadura radiografiada, en función de la actividad específica de la fuente, se observa que para espesores superiores a 80 mm y con las actividades específicas alcanzables en la práctica, es necesario usar fuentes del orden del kilocurie. En ellas, la autoabsorción puede llegar a ser un factor de importancia. Se analizan en la memoria la disminución que la autoabsorción provoca en la eficacia de la fuente y el efecto de filtración en la misma; para ello se determina un aumento equivalente en el espesor del acero y se calcula el coeficiente de absorción lineal efectiva en función de las dimensiones de la fuente y del espesor del acero irradiado. Aun tratándose de fuentes de dimensiones relativamente grandes, el efecto de diltración no provoca en el coeficiente de absorción lineal efectiva una disminución capaz de anular las ventajas respecto del 60Co.

Se analizan en el trabajo las posibilidades de mejora debidas al empleo de fuentes radiográficas modificadas. En el caso de haces primarios angostos, estas nuevas fuentes dan menores dimensiones efectivas y permiten trabajar con menores distancias entre fuente y película.

Otra ventaja del ¹⁹²Ir se observa al comparar los pesos de los equipos necesarios para el ¹⁹²Ir y para el ⁶⁰Co, tomando en cuenta actividades equivalentes de ambas fuentes para igual tiempo de exposición.

Se analizan en el trabajo las desventajas económicas del ¹⁹²Ir debidas a su corto período, y se presenta una comparación económica aproximada entre ⁶⁰Co y ¹⁹²Ir para diferentes espesores y densidades del control radiográfico.

1. INTRODUCTION

The sensitivity of the radiographic technique of using Ir^{192} in combination with a fine-grain, high-contrast film does not remain far behind the results achieved with X-ray sources if the steel thickness is within 50-120 mm
[1]. Anyhow, at these steel thicknesses it is possible to obtain higher quality radiographs with Ir^{192} than with Co^{60} .

In spite of the better quality radiographs obtained with X-ray sources in praxis, Co^{60} has been used for the control of reactor pressure-vessel welds. Chiefly, we have in mind the large vessels for gas-cooled graphite-moderated reactors, where some welds are site-welded. The main reason for applying Co^{60} is because X-ray sources, that must be used for greater thicknesses because of their weight and dimensions, are less suitable for site work. On the other hand the investment costs for adequate X-ray sources are high.

For this reason it may be possible to use Ir^{192} for such radiographic control, thereby gaining higher sensitivity and less weight in the exposure equipment. There are many objections to the application of Ir^{192} : a relatively short half-life, small penetrating power and, as a result, great exposure values. Therefore, sources of high activity and resulting greater dimensions must be used. For such sources self-absorption could become an important factor. The aim of our investigations is to find out by simple calculations the approximate limits of the applicability of Ir^{192} . After this has been done, we can more easily start with the expensive experiment in praxis.

2. THE NECESSARY SOURCE ACTIVITY AS A FUNCTION OF STEEL THICKNESS AND SPECIFIC ACTIVITY

The diagrams in Fig. 1 were calculated with the following data in mind: A fine-grain, high-contrast film with a speed factor F = 80 for the BSCRA calculator;

A film density of S = 2.2;

A focus-to-film distance of $f = 160 \ \phi$, where ϕ is the dimension of the source. The factor 160 is based on the fact that the optimum focus-to-film distance is practically constant for steel thicknesses above 50 mm because of the increasing lack of sharpness of scattering [2].

The sources are supposed to be cylinders of the same height and diameter, which have at all points the same specific activity. This approximation is justified only where the sources are built up of smaller equal parts.

The length of the weld, radiographed in one exposure, is limited by the fact that the increase of the thickness along the direction of the rays is no more than 10% of the normal thickness at the centre of the exposure. The diagrams were calculated for welds which lie in one plane. For welds on concave surfaces (e.g. circumferential welds on cylinders, and welds on spheres) a greater length is obtained, that could be taken in a single exposure, which means that the exposure per metre of radiographed weld would be less (Fig. 2).

The exposure time T for which the diagrams in Fig. 1 were made, is 20 min/m of radiographed weld. Shorter exposure times per metre of weld would give greater exposures (Ci. min) per metre of weld. This is because of enlarged focus-to-film distances which must be considered owing to the larger source dimensions.

So far the self-absorption of the source has not been considered.



Fig.1

Exposure per metre of weld as a function of the specific activity, taking into account film speed 80 (BSCRA calculator), density S = 2.2, source-to-film distance f = 160 ϕ (ϕ = effective source dimension) and 20-min exposure time per metre of weld.

The necessary activity is determined by dividing the value on the ordinate through the exposure time of 20 min. The diagrams could also be used for other values of F,S and T so that the values on the absciss is multiplied by a factor

$$K = \frac{20 \times F \times f_s}{80 \times T}$$

where f_s is the ratio of the two exposures for a radiograph of density S and density S = 2. 2.

From the diagrams it can be seen that, even at very high specific activities, very large sources are necessary to radiograph greater steel thicknesses; for instance, at 500 Ci/g for 120 mm steel, a source with ϕ = 11 mm would be practical (self-absorption not yet considered).

3. SELF-ABSORPTION OF THE SOURCE

The exact analytical determination of self-absorption in the source is almost impossible. In this case the following facts should be considered:



Comparison of exposures for welds lying in a plane and circumferential welds in cylinders with a diameter D

the spectral and local distribution, the intensity of the scattered radiation of the first and all following orders, and the bremsstrahlung due to β emission of the isotope and to the photo-and Compton-electrons [3,4]. For this reason certain simplifications for the calculation were introduced. Two calculations were made, a "pessimistic" and an "optimistic", to find out the upper and lower limit for self-absorption.

For the "pessimistic" calculation, bremsstrahlung and the scattered radiation emerging from the source were not considered, but the following linear absorption coefficient of the source material was taken into account:

$$\mu^{Ir} = \sigma_a + \sigma_c + \tau$$

where σ_a is the coefficient for Compton absorption;

 σ_c is the coefficient for Compton scattering;

 τ is the coefficient for the photo-effect.

For the "optimistic" calculation we considered the scattered radiation with no change in energy relative to the primary photon. Furthermore, we supposed that the quantity of scattered radiation is homogeneously distributed throughout the source.

$$\mu^{\mathrm{Ir}^*} = \sigma_a + \tau \; .$$

Probably the results of the optimistic calculation come very near to the real circumstances, at least for smaller dimensions of the source where the scattering of higher orders is less probable.

To simplify the calculation we treated a source of constant thickness in the direction of interest. The source is divided into infinitesimal layers of thickness dx. The intensity of the n'th spectral line to the layer dx which emerges from the source is:

$$dC'_n = \frac{c_n}{L} e^{-\mu_n^{lr} \cdot x} dx.$$

 \mathbf{c}_n $% = \mathbf{c}_n$ is the intensity of the n'th spectral line for the complete source without any absorption;

L is the thickness of the source;

 $\mu_n^{\rm Ir}$ is the linear absorption coefficient for the source material; and

x is the distance of the layer from the source-surface. After integrating over the source dimension we obtain:

$$c_{n}' = \frac{c_{n}}{\mu_{n}^{Ir} L} (1 - e^{-\frac{\mu_{n}^{Ir} L}{L}})$$

and, with further consideration of the attenuation in the irradiated steel, we get for the n'th spectral line:

$$c''_{n} = \frac{c_{n}}{\frac{Ir}{\mu_{n}}L} (1 - e^{-\frac{Ir}{\mu_{n}}L}) e^{-\frac{Fe}{\mu_{n}} \cdot d}$$

where μ_n^{Fe} is the linear absorption coefficient in steel for the spectral line n; and

d is the thickness of penetrated steel.

The dose effectiveness for a source of the thickness L and penetrated steel-thickness d is:

$$D_{E} = \sum_{1}^{n} E_{n} J_{\gamma n} \frac{c_{n}}{\mu_{n}^{Ir} L} (1 - e^{-\mu_{n}^{Ir} L}) e^{-\mu_{n}^{Fe} d}$$

where $J_{\gamma n}$ is the ionization constant; and

 E_n the energy of the n'th line photon.

The diagrams in Fig. 3 were constructed taking into account the "pessimistic" and "optimistic" calculations. In our opinion the only correct way to express self-absorption for radiography purposes is to determine the equivalent thickness of irradiated steel, which is a function of the real penetrated steel-thickness. Because of self-absorption the lower energies are very strongly attenuated but, after the penetration of steel, this is of no particular importance.

5*



Fig.3

Calculated dose rates of primary beam from Ir¹⁹², considering self-absorption of the source and absorption in irradiated steel

Also, if an experimental determination of the source effectiveness should be made, it would be necessary to measure the radiation intensity after penetrating the steel thickness in question, or a spectral analysis should be carried out.

From Fig. 3 it can be seen that even for small sources self-absorption is quite effective. It is probable that the exposure data which we have used to calculate the diagrams in Fig. 1, are determined experimentally with 4×4 or 6×6 -mm sources for which the self-absorption was taken into account with the introduction of an "effective" activity (0.5 r/l m/h for 1 Ci). Therefore, it is more correct to take the slope for L = 5 mm as a reference line.

4. THE FILTRATION EFFECT AT SELF-ABSORPTION

Because of the self-absorption effects the spectral composition of the emerging rays is changed compared with the normal spectra for Ir^{192} . On one hand the presence of scattered radiation and bremsstrahlung causes lower average energy whereas, on the other hand, the filtration effect shifts

the average towards higher energies. Here we only wanted only to prove that, even when considering only the filtration effect, the effective linear absorption coefficient in steel would nevertheless remain sufficiently higher in comparison with Co^{60} (see Fig. 4).

From

and

$$J = \sum_{1}^{n} \frac{c_{n}}{\mu_{n}^{Ir}} (1 - e^{-\mu_{n}^{Ir}})e^{-\mu_{n}^{Fe} \cdot x}$$

 $\mu = -\frac{1}{J} \frac{dJ}{dx}$





Linear absorption coefficient as a function of irradiated steel, considering the filtration effect of the self-absorption (calculated, scattered radiation and bremsstrahlung from the source neglected)

$$\mu = \frac{\sum_{n=1}^{n} \frac{c_{n}}{\mu_{n}^{Ir} L} (1 - e^{-\mu_{n}^{Ir} L}) \mu_{n}^{Fe}, e^{-\mu_{n}^{Fe} x}}{\sum_{n=1}^{n} \frac{c_{n}}{\mu_{n}^{Ir} L} (1 - e^{-\mu_{n}^{Ir} L}) e^{-\mu_{n}^{Fe} \cdot x}}$$

In praxis more favourable results, i.e. higher effective absorption coefficients, can be expected. For greater source dimensions the influence of scattered radiation will increase because the participation of heavy filtered primary rays from the rear part of the source is almost negligible.

5. SOURCE SHAPE

For every point of the radiograph the most convenient shape of the source gives the smallest effective dimension in regard to the geometrical unsharpness. To determine the optimal shape it is necessary to consider the influence of the source shape on the self-absorption and on the geometrical unsharpness. There is little to gain by reducing the exposure because of the smaller effective source size that allows smaller focus-to-film distances, if at the same time we increase the self-absorption.

When radiographing short sections with great focus-to-film distances that result in a narrow beam of useful radiation, we will get the smallest source shape by an elongated source in the direction of the beam. For the radiography of welds in one plane (max 60° divergence) the source shape in Fig.5 is suggested. For the proposed shape the effective dimension for points at the end of the radiographed section would be almost the same as for points in the centre of the beam. For easier production the shape could be approximated by cylinders, as shown by the dashed lines in Fig.5.

6. COMPARISON OF THE WEIGHTS OF EXPOSURE EQUIPMENT FOR Ir¹⁹²AND Co⁶⁰ SOURCES

In Fig. 6 diagrams of the exposure equipment are plotted against the activity for Ir^{192} and equivalent Co^{60} sources requiring the same exposure time. The diagrams are calculated under the following conditions:

Only the weight of the lead shield is taken into account;

- The shield is cylindrical with a 2-cm space for the source in the centre; The shielding is sufficient to limit the dose rate at 1 m to 5 mr/ \hat{h} ;
- To determine the attenuation of gamma-rays in the shield we considered the values for broad-beam attenuation already published [5,6].

From Fig. 6 it can be seen that the weight of the exposure equipment for Co^{60} is rather high compared with the weight of the equipment for the equivalent Ir^{192} sources. The difference in weight for the complete equipment is even greater because heavier support frames and other auxiliaries are necessary.





Proposition for a source shape for relative narrow beams



Fig.6

Weight of exposure equipment Pb for Ir¹⁹² sources and the equivalent Co⁶⁰ sources regarding the thickness of irradiated steel

7. A ROUGH ECONOMIC COMPARISON FOR Ir¹⁹² AND Co⁶⁰

The discussion is limited to the expenses of the source per metre of the radiographed weld of different thicknesses.

Data given in Table I are determined by the following:

The sources are used for the time of two half-lives.

The density of radiographic control throughout this time is constant and is taken into account by the exposure time per day.

The price for the sources is considered to be \$ 5 for Ir^{192} and Co^{60} [7], which is an approximate price of low-activity sources in Yugoslavia. It can be expected that the price for higher-activity sources will be eventually reduced. The price for Co^{60} sources of high activity and high specific activity is lower in many countries than is taken into account here [8]; probably the same will apply to Ir^{192} .

The calculation is made by determining the price for 1 Ci. min of exposure. Therefore, the number of useful curie-minutes for 1 Ci is calculated. The price for 1 Ci is divided by the number of useful curie-minutes to obtain the price for 1 Ci. min. From the diagrams in Fig. 1 we get the necessary curie-minutes for radiographing 1 m of weld, taking into account the equivalent steel thickness for self-absorption from Fig. 3.

Table I shows that radiography with Ir^{192} is more expensive than with Co^{60} . As long as the source price for 1 m of radiographed weld is much

TABLE I

COSTS OF THE RADIOGRAPHIC SOURCE PER METRE OF RADIOGRAPHED WELD

(calculated for 50% exposure time throughout two half-lives) (\$)

Steel thickness (mm)	Source				
	Ir ¹⁹²		Co ⁶⁰		
	100 Ci/g	400 Ci/g	50 Ci/g	200 Ci/g	
50	0.20	0.10	0.005	0.0025	
· 60	0.40	0.20	0.01	0.005	
70	. 1.0	0.40	0.015	0.008	
80	2.6	0.90	0.03	0.015	
90	7.0	2.50	0.06	0.03	
100	18.0	6.0	0.12	0.05	
110	44.0	17.0	0.25	0.10	
120	100.0	40.0	0.45	0.20	

D. HORVAT

lower than the total cost for 1 m of radiograph, which could be assessed at about \$ 5 or more, the greater expense for Ir^{192} can be easily accepted. Where the cost of the source per metre of weld is high compared with other costs, the applicability of Ir^{192} is limited for economic reasons.

8. CONCLUSION

The application of Ir^{192} for controlling welds in reactor pressurevessels is limited by the steel thickness which is to be radiographed. The influence of the filtration effect due to self-absorption in the source is of no importance. Even for very large thicknesses of radiographed steel the linear absorption coefficient is not very much changed.

In radiographing large steel-thickness the effect of self-absorption is tolerable for sources up to 20 mm long. The greatest handicap in applying Ir¹⁹² at greater steel-thicknesses is the high cost of the source per metre of radiographed weld. If lower prices for high-activity Ir¹⁹² sources could be expected in the future the steel-thickness limit could be extended. The weight of exposure equipment for Ir¹⁹² is very low and therefore favourable. Further improvements could be achieved by studying the source shape.

REFERENCES

[1] MÖLLER, H., Materialprüfung 4 (1962) 106.

- [2] BECKER, E., Materialprüfung 6 (1964) 160.
- [3] EVANS, R.D. and EVANS, R.O., Rev. of Mod. Phys. 20 (1948) 305-326.
- [4] WYARD, S.J., Nucleonics 13 (1955) 44-45.
- [5] BARKER, R.F., in Nondestructive Testing Handbook (MCMASTER R.G., Ed.), The Ronald Press Company, New York (1959) 11, 26.
- [6] FROST, D., in Praktischer Strahlenschutz, Walter De Gruyter & Co., Berlin (1960) 132.
- [7] Radioactive Isotopes, Boris Kidrič Institute of Nuclear Sciences, Vinča, Yugoslavia.
- [8] KUKACKA, L.E. and MANOWITZ, B., Nucleonics 23 (1965) 74.

DISCUSSION

R.F. HANSTOCK: The cost of radiographing welds in thick pressure vessels cannot be estimated simply in terms of the capital cost of equipment. In the construction of pressure vessels for nuclear reactors in the United Kingdom, thicknesses of steel up to 75 mm were radiographed with X-ray equipment of 400 kV. For greater thicknesses, Co^{60} sources have been used, but above 100 mm thickness exposure times are long for source distances giving acceptable geometrical unsharpness. A 4.3-MeV linear accelerator has been used in the radiography of one large pressure vessel. Its capital cost was high, but it allowed much quicker weld radiography – and thus reduced the total cost – while still maintaining the desired standard of resolution. The question of the relative economic and technical advantages of iridium and cobalt isotopes, and of different types of X-ray equipment,

cannot be answered without considering all the relevant factors of installation and fabrication of the vessel.

D. HORVAT: I think the very fact of my having written this paper shows my awareness of the effect of exposure time on the cost of radiographic inspection and on the suitability of particular sources. If the exposure time did not have to be taken into account there would in fact be no problem. On the other hand, it should be remembered that no practical advantage is to be gained from reducing the exposure time to less than the time taken to set up the exposure. For example, if the exposure time is halved, the total time required to make the exposure is reduced by only 25%; by reducing the exposure time to a quarter we gain only 12.5%, and so on. Bearing in mind that the set-up time for a radiograph is about 10 min, I considered an acceptable exposure time to be about 20 min/1 m of radiographed weld.

As the weight of radiographic equipment required for Ir^{192} is, on a rough estimate, at least 20 times less than for the linear accelerator mentioned, the set-up time and cost will also be much less. The investment cost itself can be estimated at about 20 times less, though the advantage is even more marked in countries which do not produce linear accelerators but can produce high-activity Ir^{192} . For a more complete picture the total cost per 1 m of radiographed weld should be compared for the linear accelerator and for Ir^{192} . Such a comparison would have to take into account the density of the radiographic inspection, the thickness of the steel inspected and the amortization costs. For the radiography of circumferential welds, the angle of the beam, where the intensity of the radiation varies within a permissible range, is also a factor influencing the exposure time per 1 m of radiographed weld.

The application of Ir^{192} does of course have its limitations, and my paper aimed at pointing them out.

G.H. TENNEY: Reference has been made to the considerable financial saving obtained by using a 4.3-MeV accelerator due to quicker radiography. My point is that the short exposure time is of no great importance because it is a small part of the entire inspection (set-up time, dark room, interpretation). The panoramic set-up is also a time-saving technique when isotopes are used. I feel that what we should really aim for is greater radiographic sensitivity, and in this respect a 4.3-MeV radiation produces a radiographic contrast no better than that of Ir ¹⁹².

In general it is not advisable to recommend one source of radiation as opposed to another, especially when the energy involved differs by a factor of 10. Each source and each energy have their place in industrial radiography. There are limits and there are overlaps, but ultimately the thickness and density of the material and the relevant specifications determine the selection. • . n

UTILISATION DE LA RADIOGRAPHIE A BASSE TENSION POUR LA DETECTION DE DÉFAUTS DANS LES TUBES A PAROIS MINCES EN POUDRE D'ALUMINIUM FRITÉE

P. BONNET ET J. JANSEN EURATOM, C.C.R. ISPRA, ITALY

Abstract — Résumé — Аннотация — Resumen

USE OF LOW-VOLTAGE RADIOGRAPHY IN DETECTING FLAWS IN THIN-WALLED SINTERED ALUMINIUM POWDER (SAP) TUBES. Low-voltage radiography has been considered as a method of detecting flaws in thinwalled tubes. In standard radiography the two walls of a tube cannot be separated and the geometric conditions affect the relative blackening of the film. To overcome this drawback two radiographic techniques have been developed: the "rotative" technique, more suitable for tubes of fairly wide diameter; and the "rolling" technique, particularly suitable for fuel-element cans, having been developed principally for testing finned tubes, which present considerable technological obstacles to testing by the normal methods. This subject has already been dealt with to some extent.

1. The principle of the "rotative" technique is as follows: The tube is irradiated through a slit of variable width. The film is placed inside the tube held by a chuck of opaque material, usually lead. The tube, film and chuck are then rotated together. The authors give their findings on the effect of various parameters on the degree of geometric sharpness. (a) Source-slit distance; (b) Slit width; (c) Radiation characteristics; (d) Speed of rotation. A suitable expanding chuck is also illustrated.

2. The principle of the "rolling" technique likewise stems from the requirement that only one tube wall shall be radiographed. Irradiation is again carried out through a slit but, while the tube is being rotated, the film is moved in such a way that its linear speed matches the rotational speed of the tube at its external face. Preliminary tests have shown that this is a perfectly sound technique.

The authors then discuss the optimum conditions attaching to the techniques, including speed of film transport, width of slit, etc. Results obtained with tubes containing real or artificial flaws are also presented.

Finally, the authors consider the semi-industrial use of these techniques, analysing their advantages and disadvantages.

UTILISATION DE LA RADIOGRAPHIE A BASSE TENSION POUR LA DÉTECTION DE DÉFAUTS DANS LES TUBES A PAROIS MINCES EN POUDRE D'ALUMINIUM FRITTÉÉ. L'utilisation de la radiographie à basse tension a été envisagée pour la détection de défauts dans les tubes à paroi mince. La radiographie du type classique ne permet pas de séparer les deux parois du tube et l'effet géométrique joue sur le noircissement relatif du film. Pour pallier cet inconvénient, deux méthodes ont été développées. La première, appelée radiographie rotative, est applicable surtout pour les tubes de diamètre assez important la deuxième, appelée radiographie par roulement;est applicable plus particulièrement aux tubes de gaines; elle a été surtout développée pour l'examen des tubes à ailettes, où l'application des méthodes classiques présente de grandes difficultés technologiques. Ce sujet a déjà été partiellement traité.

 La radiographie rotative repose sur le principe suivant: on irradie le tube à travers une fente de largeur variable. A l'intérieur de ce tube, supporté par un mandrin opaque généralement en Pb, se trouve le film. L'ensemble tube-film-mandrin est mis en mouvement de rotation. Le mémoire présente les résultats sur l'influence de différents paramètres sur le flou géométrique: a) distance source-fente; b) largeur de la fente;
 c) caractéristiques du rayonnement; d) vitesse de rotation du tube. Un schéma de mandrin expansible pratique est également donné.

2. Le principe de la radiographie par roulement découle de la même préoccupation de ne radiographier qu'une paroi du tube. L'irradiation se fait également à travers une fente; tandis que le tube tourne, le film se déplace de telle façon que la vitesse de la surface (circonférence) du tube est égale à la vitesse linéaire du film. Des essais préliminaires ont montré que cette méthode était parfaitement valable.

L'étude porte également sur les meilleures conditions d'utilisation, en particulier: vitesse de translation du film, largeur de la fente, etc. Des résultats pratiques sont également présentés sur des tubes possédant, soit des défauts réels, soit des défauts artificiels. Les auteurs présentent enfin quelques considérations sur l'utilisation serni-industrielle de tels procédés en analysant leurs avantages et leurs inconvénients.

ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОВОЛЬТАЖНОЙ РАДИОГРАФИИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ТРЕЩИН В ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБАХ ИЗ СПЕЧЕННОГО АЛЮМИНИЕВОГО ПОРОШКА. Для обнаружения дефектов в тонкостенных трубах предусмотрено применение низковольтажной радиографии. Радиография обычного типа не позволяет разделить две стенки трубки, и геометрический эффект сказывается на относительном потемнении пленки. Для устранения этого недостатка были разработаны два метода. Первый назван методом "вращения" и применяется главным образом к трубам достаточно большого диаметра, второй – методом "качения" и применяется чаще к трубчатым оболочкам топливных элементов. Последний метод разрабатывался, главным образом, для изучения ребристых труб, с которыми связаны большие технологические трудности в случае применения обычных методов. Эта тема уже частично разрабатывалсь.

1. Метод "вращения" заключается в следующем. Трубы облучают через щель с переменной шириной. Внутри трубы, имеющей непроницаемый сердечник, обычно из свинца, находится пленка. Весь комплекс (труба-пленка-сердечник) приводится во вращательное движение. Приводятся результаты воздействия различных параметров на геометрическую погрешность: a) расстояние между источником и щелью; б) ширина щели; в) характеристики излучения; г) скорость вращения трубы.

Дается также схема раздвижного сердечника.

2. Метод "качения" отвечает той же цели-радиографировать лишь стенку трубы. Облучение производится также через щель, и трубка, поворачивающая пленку, перемещается таким образом, что круговая скорость трубы становится равной линейной скорости пленки. Предварительные опыты показали приемлемость этого метода.

Изучались наилучшие условия применения, в частности: скорость передвижения, ширина щели и пр. Излагаются также практические результаты в отношении труб, у которых имеются либо естественные, либо искусственные дефекты. Приведены некоторые замечания о полупромышленном применении подобных методов с анализом их преимуществ и недостатков.

EMPLEO DE LA RADIOGRAFIA A BAJA TENSION PARA LOCALIZAR DEFECTOS EN TUBOS DELGADOS DE SAP. Para localizar defectos en los tubos de pared delgada se ha pensado en utilizar la radiografía a baja tensión, puesto que con la del tipo habitual no se puede establecer separación adecuada entre las dos paredes del tubo, y el efecto geométrico influye en el ennegrecimiento relativo de la película. Dos métodos se han establecido con miras a superar este inconveniente. El primero denominado radio-rotativo, es principalmente aplicable a los tubos de diámetro bastante grande; el segundo, llamado de radio-arrollamiento es especialmente adecuado para los tubos de revestimiento y se destina más bien al examen de los tubos con aletas, en los cuales la aplicación de los procedimientos tradicionales ofrece grandes dificultades técnicas. Este tema se ha tratado ya parcialmente.

1. En lo fundamental, el método radio-rotativo consiste en lo siguiente: se irradia el tubo a través de una ranura de ancho ajustable. En el interior del tubo, sostenido por un mandril opaco que suele ser de plomo, se encuentra la película. Al conjunto, es decir, tubo, película y mandril, se le imprime un movimiento de rotación.

En la memoria se exponen los resultados obtenidos según distintos parámetros que influyen en el velado geomětrico: a) distancia entre la fuente y la ranura, b) ancho de la ranura, c) características de la radiación, d) velocidad de rotación del tubo. Se propone un modelo de mandril extensible

2. El método de radio-arrollamiento responde también a la necesidad de radiografiar sólo una pared del tubo. La irradiación se efectúa asimismo a través de una ranura y, mientras el tubo gira, la película se desplaza de tal manera que la velocidad periférica del tubo resulte igual a la velocidad lineal de la película. Los ensayos realizados han demostrado que el método es perfectamente utilizable.

El estudio se refiere luego a las condiciones óptimas de utilización, en particular a la velocidad de avance de la película, ancho de la ranura, etc. Se exponen los resultados prácticos obtenidos empleando tubos con defectos reales y con defectos artificiales.

Por último, se formulan algunas observaciones sobre la utilización de esos métodos en escala semindustrial y se analizan sus ventajas y sus inconvenientes.

INTRODUCTION

A ce jour, il semble généralement admis que pour le contrôle industriel ou semi-industriel de tubes légers destinés aux usages nucléaires, la radiographie ne puisse être retenue qu'à titre de recoupement. La méthode est lente et coûteuse et présente une sensibilité aux discontinuités inférieure à d'autres méthodes telles que les ultrasons, par exemple.

Néanmoins, cette méthode nous a permis de détecter des inclusions lourdes et se révèle susceptible de rendre des services, particulièrement pour les tubes ailetés. Elle permet de plus d'établir un document parlant qui peut être consulté à tout moment. En outre, la radiographie peut être précieuse pour des études particulières relatives à la localisation précise des défauts et à la détermination de leur forme. Elle mérite donc qu'un effort soit fait en vue de son application particulière à nos problèmes.

Le contraste acceptable est obtenu par l'emploi de tensions basses, excitant un tube à anticathode de tungstène $(1, 5 \times 1, 5 \text{ mm})$ et à fenêtre de béryllium. On obtient ainsi, à haute intensité, des radiations peu pénétrantes et faiblement filtrées.

Plusieurs laboratoires ont essayé des procédés d'amélioration des radiations, comme les anticathodes fines donnant une meilleure résolution ou la réduction de la filtration par réduction de l'épaisseur de la fenêtre ou remplacement de l'air par l'hélium ou même le vide.

Nous avons suivi une autre voie d'approche qui consiste à utiliser des anticathodes dites monochromatiques dont les caractéristiques devraient fournir un contraste amélioré. Des expériences préliminaires font espérer une légère augmentation de contraste à noircissement égal. Des essais au moyen de tubes commerciaux à haut débit permettront de savoir si, à temps d'exposition égal, une anticathode monochromatique donne dans notre cas un meilleur contraste que la classique anticathode de tungstène. Accessoirement, le caractère monochromatique affirmé de ces radiations permet de les utiliser comme étalon de comparaison entre divers rayonnements (changement d'appareillage ou de tube, variation de la filtration, etc.).

La résolution a été améliorée par des techniques à une paroi décrites dans ce mémoire: la radiographie rotative et la radiographie par roulement. La confrontation des deux méthodes permet d'en fixer les applications et les limites.

Techniques à une seule paroi

Dans la radiographie classique de tubes de gaine ou de force, une grosse difficulté réside dans l'éloignement de la paroi antérieure du tube par rapport au film. On arrive très vite à des flous géométriques considérables ou à des longueurs focales inacceptables; de plus, les différences d'épaisseurs traversées limitent la largeur utile et obligent à tirer quatre clichés au moins.

Les techniques à une seule paroi, malgré leurs inconvénients (lenteur et complication), réduisent l'épaisseur apparente de l'objet et en fournissent une image développée d'interprétation plus aisée.

Ų

1. RADIOGRAPHE ROTATIVE

1.1. Principe

La radiographie rotative s'inscrit dans le cadre de la radiographie d'objets en mouvement. Mais à l'encontre de la tomographie où seul l'objet reste immobile, ici l'objet et le film se meuvent solidairement.

La figure 1 illustre le principe de la méthode. Un mandrin cylindrique (20) supporte une feuille de plomb (17) sur laquelle est enroulé et fixé le film radiographique (18). L'ensemble est introduit et fixé dans le tube à contrôler (19). Le tube est mis en rotation à vitesse constante et irradié à travers une fente étroite délimitée par des écrans opaques. La largeur et la position de la fente sont ajustables.



DÉTAIL DE L'ENSEMBLE TUBE-FILM



Détail de l'ensemble tube-film.

16: Ecrans opaques.19: Tube à radiographier.17: Support opaque.20: Support.18: Film.20: Support.

La figure 2 montre le prototype qui a servi aux premières expérimentations sur tronçons de tubes de force en SAP (sintered aluminium product). Une fente de largeur réglable assure la collimation. Un moteur à variateur de vitesse entraîne le tube de façon qu'il fasse un tour ou un nombre entier de tours pendant la pose. L'ensemble est conçu de manière à réduire les vibrations, dont l'influence sur la qualité de l'image est d'ailleurs pratiquement nulle.

Le système permet la radiographie par tronçons de longueurs de tubes indéterminées. Ceci exige un mandrin spécial mis en place au moyen d'un outil d'introduction et de serrage.

La figure 3 illustre le projet retenu qui offre l'avantage de ne présenter dans l'enveloppe que des discontinuités minimes peu nuisibles à la qualité de l'image. Cet appareil a permis de vérifier l'interaction des différents paramètres, prédite par le calcul simple qui suit.





Prototype d'appareillage pour la radiographie rotative.



Figure 3 Mandrin expansible **à** coin.

1.2. Flou rotatif et durée de rotation

Les éléments géométriques du système sont schématisés sur la figure 4. La source, supposée ponctuelle, est en S, le centre du tube en O. Le film



Figure 4

Principes géométriques de la radiographie rotative.

est enroulé sur une circonférence de rayon r. Le rayon extérieur du tube est R. Son épaisseur vaut R - r = e. La distance entre la source S et la superficie du tube est F, tandis que SO vaut D ou R + F. F peut être approximativement considérée comme «distance focale». La largeur de la fente est f. On l'assimile à l'arc irradié, soit f $\simeq 2R\alpha$.

On voit que l'image du point P, au moment où il est au milieu de la fente, se situe en I, sur le rayon PO. L'image du point P_1 au bord de la fente est en I₁, éloigné d'un angle β de l'image centrale. On appelle flou rotatif d la distance sur le film entre les deux images extrêmes du point P, soit d = $2r\beta$.

La relation entre α et β nous donnera le flou rotatif en fonction des autres paramètres. Les développements sont simplifiés en adoptant deux axes orthogonaux passant par le centre du tube et solidaires de celui-ci. Ceci revient à supposer le tube fixe et à considérer que la source tourne autour du tube.

En S, la source donne du point P l'image I. En S₁, après rotation de α , la source donne du point P l'image I₁ qui a tourné de l'angle β par rapport à I.

Considérons les points P, S_1 , I_1 dont les coordonnées sont données au bas de la figure 4. La condition de collinéarité de ces trois points est la suivante:

$$\frac{X_3 - X_1}{X_2 - X_1} = \frac{Y_3 - Y_1}{Y_2 - Y_1}.$$

En introduisant les valeurs des coordonnées, on arrive à la relation

$$\frac{D\cos\alpha - R}{D\sin\alpha} = \frac{r\cos\beta - R}{r\sin\beta}.$$

Le flou géométrique doit être invisible à l'œil nu, ce qui conduit à des largeurs de fentes très réduites. On vérifie que pratiquement dans tous les cas, α et β sont suffisamment petits pour justifier les approximations.

$$\sin \left| \begin{array}{c} lpha \\ eta \end{array}
ight| lpha \simeq \left| \begin{array}{c} lpha \\ eta \end{array}
ight| {\rm et} {\rm cos} \left| \begin{array}{c} lpha \\ eta \end{array}
ight| \simeq 1.$$

'Nous avons alors

$$\frac{\alpha}{1-\frac{R}{D}} = \frac{\beta}{1-\frac{R}{r}} \; .$$

En tenant compte des identités suivantes:

- flou géométrique : $d = 2r\beta$,
- largeur de fente : $f = 2r\alpha$,
- distance focale : F = D R.
- épaisseur : e = R r,

on arrive à

$$d = f. e\left(\frac{1}{F} + \frac{1}{R}\right)$$
(1)

qui donne le flou en fonction des autres paramètres. A titre d'exemple, calculons le flou rotatif dans le cas du tube de force qui a servi aux expériences. On a

$$R = 48; r = 45; e = 3.$$

Pour une distance focale F = 300 mm et une fente de 1 mm on obtient

$$d = 0,073 \text{ mm}.$$
 (2)

Remarquons que si cette courte focale réduit la longueur de la portion irradiée, elle ne nuit nullement à la netteté de l'image. En effet, le flou rotatif dépend peu de la longueur focale et, dans ce cas-ci, pour un foyer de 1.5×1.5 mm, le flou géométrique vaut 0,015 mm.

Remarquons aussi qu'en suivant la méthode classique à double paroi, l'obtention d'un flou géométrique analogue, soit 0,09 mm, exigerait une focale de 1600 mm environ.

Le temps T nécessaire à l'irradiation totale est donné par la relation

$$T = t \frac{\text{circonférence}}{\text{arc irradié}} = t \cdot \frac{2\pi R}{f}$$

1.3. Interaction des paramètres

Quelques courbes, tracées pour le tube de force cité plus haut, montrent mieux l'interaction des paramètres et les limites de la méthode. Notons que les valeurs du flou sont calculées dans le cas d'un mandrin non expansible, portant l'épaisseur apparente e à 6 mm.

Les courbes de la figure 5 illustrent

- le peu d'importance de la distance focale,
- la nécessité de réduire la fente et la multiplication du temps de pose par des facteurs considérables.

1.4. Utilisation pratique

Etant donné la complexité relative de la méthode, il semblait utile de mettre à la disposition de l'utilisateur un moyen de calcul rapide. A cette fin, nous avons établi le diagramme de la figure 6.

Les relations (1) et (2) peuvent s'écrire comme des fonctions entre paramètres non dimensionnels,

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{e}} = \frac{\mathrm{f}}{\mathrm{R}} \cdot \left(1 + \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{R}}\right),\tag{3}$$

$$\frac{\mathbf{t}}{\mathbf{T}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\mathbf{f}}{\mathbf{R}} \ . \tag{4}$$

6*

Le diagramme 6 illustre à deux échelles ces deux fonctions de f/R sous la forme d'un faisceau de droites concourantes. Trois tableaux évitent les calculs relatifs aux paramètres non dimensionnels. De cette façon, il est possible de résoudre rapidement les deux problèmes suivants:

- a) Le temps étant fixé, déterminer les autres paramètres.
- Le graphique donne f/R et le tableau 1, la valeur de f.
- R connu et F choisi, le tableau 3 fournit 1 + R/F.
- Le graphique donne d/e en ordonnées et le tableau 2 donne d.



Figure 5

Courbes de netteté et de temps rapportées à la largeur de fente dans le cas d'un tube de force ORGEL. R=48 mm; épaisseur; 3 mm; épaisseur apparente e = 6 mm.

b) Le rapport d/e étant imposé, déterminer les autres paramètres.

On procède de façon analogue, en déterminant successivement d/e, (R + F)/F, f/R, f, t/T.

L'opérateur peut donc connaître facilement le temps d'exposition total et la qualité d'image résultante.

1.5. Illustrations

La figure 7 comporte trois clichés rotatifs d'un tube de force sur lequel on avait pratiqué des défauts artificiels et collé des pénétramètres DIN.

Les clichés, réalisés dans des conditions égales, montrent clairement le gain de contraste obtenu dans le cas d'une fente étroite et le flou important dans le cas d'une fente large. Sur le troisième cliché, on peut observer que le flou rotatif est difficilement perceptible à l'œil nu. Néanmoins, une réduction supplémentaire conduira à des fentes plus étroites, ce qui ne va pas sans inconvénients. En effet, la fente était délimitée par des lames de plomb taillées sans précautions spéciales. On observe que les moindres irrégularités se traduisent par des différences de densité nettement perceptibles. (Actuellement, nous utilisons des fentes en acier inoxydable).



Figure 6 • Diagramme d'utilisation.

UTILISATION DE L'A RADIOGRAPHIE A BASSE TENSION



Figure 7

Défauts artificiels sur la paroi externe d'un tube de SAP de 95 mm de diamètre, Film D/4 Gevaert. Tension: 40 kV.

Film 1: exposition statique (film sur mandrin), distance focale: 300 mm. Film 2: exposition rotative, distance focale: 800 mm, fente: 20 mm. Film 3: exposition rotative, distance focale: 300 mm, fente: 2 mm.

On en conclut que l'on peut utiliser des focales courtes. On est limité dans ce sens par le flou géométrique qui doit rester faible devant le flou rotatif, et surtout par la longueur utile du film, longueur qui décroît proportionnellement à F.

1.6. Temps d'exposition relatif

La méthode peut se révéler bien lente et il semble désirable d'évaluer, même grossièrement, les rapidités d'exposition des deux méthodes, en prenant comme critère une qualité d'image équivalente, même pour la paroi antérieure.

.

a) Radiographie rotative

Soit, à titre d'exemple, les conditions suivantes, proches des conditions réelles:

> F = 200 mm, e = 3 mm, R = 50 mm, t/T = 200.

Le diagramme 6 nous donne les valeurs suivantes: (F + R)/F = 1, 25, d/e = 0, 039, d = 0, 12 mm, f/R = 0, 314, f = 1, 57 mm.

L'angle au sommet du faisceau conique étant de l'ordre de 45°, la longueur utile de film sera à peu près

1 = 100 mm.

b) Radiographie classique

En radiographie classique, un flou géométrique i = 0, 117 mm nous donne une distance focale F' \simeq 1400 mm = 7 F, avec pour conséquences:

- Une longueur utile de film sept fois plus grande. En pratique, il faut se limiter à des dimensions standard et l'on adoptera

$$1! = 400 \text{ mm} = 41.$$

Cet avantage est d'ailleurs annulé par l'obligation pratique de tirer au moins quatre clichés à 90°. On n'en tiendra donc pas compte.

- Un temps de pose augmenté. Si t_F , temps d'exposition de deux parois à F = 200 mm, t_F = 2t, est donné par la loi des carrés*

$$t_{F}/t_{F'} = (F/F')^2$$
,

ce qui nous donne $t_{F'} \simeq 50$, $t_F = 100$ t, alors que

T = 200 t.

En conséquence, une exposition rotative serait seulement deux fois plus longue que l'exposition statique correspondante. Evidemment, si l'on exige la netteté de la paroi d'émergence seulement, le rapport devient plus élevé.

1.7. Conclusion

La radiographie rotative présente donc les caractéristiques favorables et défavorables suivantes:

^{*} Non valable pour les radiations molles, mais défavorable: tF, serait plus grand, si la loi des carrés était appliquée.

Inconvénients

- Manipulation du tube, du mandrin et du film;
- Lenteur.

Avantages

- Image développée de la paroi du tube: localisation plus précise et meilleure détectabilité des défauts;
- Moins grand nombre de films à traiter et archiver.

2. EXPOSITION AUTOMATIQUE PAR SECTEURS

Comme précédemment, le film est enroulé dans le tube sur un mandrin opaque. Des portions de circonférence sont exposées successivement.

La méthode nécessite un équipement un peu plus complexe que la radiographie rotative continue. De plus, des précautions spéciales sont exigées pour éviter des jours ou des recouvrements aux limites des plages d'exposition.

Les essais effectués ont montré une uniformité de densité et une définition des défauts très satisfaisantes sur des portions de largeur égale à 1/15 de la circonférence. Le temps est donc considérablement réduit.

3. RADIOGRAPHIE PAR ROULEMENT

Le procédé est illustré par la figure 8. Le tube est animé d'un mouvement de rotation autour de son axe. Le film, posé à plat sur une table roulante, défile à une vitesse égale à la vitesse périphérique de la paroi postérieure du tube, et dans le même sens. La portion irradiée est limitée par un écran antérieur muni d'une fente de largeur réglable. Un second écran, facultatif, plus fin et disposé contre le film, arrêtera les radiations secondaires.



Figure 8

Principe de la méthode par roulement.

L'image de la paroi postérieure peut donc être rendue très nette tandis que l'image de la paroi antérieure, animée d'un mouvement en sens inverse, sera très floue et se traduira, en fait, par une teinte grise quasi uniforme.

Gette méthode n'est donc pas à proprement parler une méthode à une paroi, mais elle en présente les avantages recherchés, à savoir l'obtention de l'image d'une seule paroi et le développement à plat de toute la surface du tube.

La partie mécanique est plus complexe que pour la radiographie rotative. De plus, le contraste est légèrement réduit. En revanche, on évite l'introduction d'un mandrin et les dommages éventuels liés à la courbure du film.

3.1. Principes mécaniques

Un moteur à variateur de vitesse (5) entraîne le tube (1) et la table (7)sur laquelle est fixé le film (2) (fig. 9). Le tube est entraîné par roulement de galets sur sa surface externe, ce qui assure le synchronisme indépendamment du diamètre. Les dimensions des poulies et des roues dentées (4)et (6) sont choisies de façon à assurer un rapport 1/1; de plus le variateur (8) permet de légères variations dont l'utilité sera montrée plus loin.

Le problème des tubes à ailettes, peu aptes à rouler, est résolu par des manchons cylindriques intermédiaires, dont l'intérieur épouse la forme des ailettes et l'extérieur roule sur les galets (fig. 10).





Dispositif mécanique du prototype.

- 1: Tube à radiographier.
- 5: Moteur à vitesse variable.
- 2: Film.
- 7: Chariot porte-film.
- 4 et 6; Roues dentées.
- 7: Charlot porte-film.
- 8: Variateur de synchronisme (facultatif).



Figure 10

Dispositif de roulement pour tubes à ailettes.

- S: Source. 17: Galet de roulement. 12: Poulie d'attaque. 39: Ecran. 42: Demi-coquilles boulonnées.
- 15: Galet moteur.

3.2. Evaluation des paramètres

L'exploitation de la méthode rend souhaitable la connaissance des grandeurs suivantes:

- Flou dans l'image de la paroi antérieure;

- Flou dans l'image de la paroi d'émergence.

Temps d'exposition

La figure 11 explicite les différents paramètres:

- D, D_1 , D_2 sont respectivement les distances à la source, du film, de la fente postérieure et de la fente antérieure;
- p, p₁, p₂ sont les demi-largeurs de faisceau interceptées par le film, la fente postérieure et la fente antérieure;
- i, i₁, i₂ sont les distances de la paroi du tube au film et aux écrans;
- F est la distance à la source du centre du tube;
- R est le rayon du tube;
- α et β correspondent aux demi-arcs interceptés par les rayons marginaux.

On voit que

$$D/p = D_1/p_1 = D_2/p_2 = D_3/p_3$$

et que les p_i sont proportionnels aux D_i. Dans les calculs qui suivent, l'on supposera i nul et, par conséquent, le film dans le plan IT (p est assimilé à p₃).



Figure 11

Principes géométriques de la radiographie par roulement.

3.3. Calcul de p

Les relations entre p et les angles α et β constituent la clé des phénomènes et sont donc établies en premier lieu. Le tableau de la figure 11 rassemble les coordonnées des points P, Q et I dans le système d'axes rectangulaires choisi.

a) p en fonction de α

La condition de collinéarité des points S, P et I nous donne

$$\frac{p}{D} = \frac{R \sin \alpha}{F - R \cos \alpha} .$$
(5)

b) p en fonction de β

La condition de collinéarité des points S, Q et I nous donne

$$\frac{\mathbf{p}}{\mathbf{D}} = \frac{\mathbf{R}\,\sin\beta}{\mathbf{R}\,\cos\beta + \mathbf{F}} \,. \tag{6}$$

3.4. Flou de la paroi antérieure

Nous supposerons tout d'abord le synchronisme parfait. Pendant que le point P décrit l'arc PR de longueur αR , le film avance également de αR tandis que la projection de P sur le film décrit le segment IT = p. Les deux mouvements, de sens contraires, s'additionnent et l'on a

$$d_a = 2(p + \alpha R) = 2\left(\frac{DR \sin \alpha}{F - R \cos \alpha} + \alpha R\right).$$
(7)

Evaluons d_a dans un cas courant: soit R = 13 mm, D = 500 mm et α = 5° ou 0,087 radians. On trouve

$$d_a = 2(1, 19 + 1, 13) = 4,64 \text{ mm}.$$

Généralement d_a sera voisin de 2p et prendra donc des valeurs amplement suffisantes.

3.5. Flou de la paroi postérieure d

Pendant que le point T décrit l'arc $TQ = \beta R$, le film avance également de βR , et la projection du point T sur le film décrit, dans le même sens, le segment IT. En réalité, on sera amené à modifier le synchronisme, ce que nous exprimons par le facteur Δ voisin de l'unité et multiplicateur de l'arc βR . On trouve

$$d = 2(p - \Delta, \beta, R) = 2\left(\frac{DR\sin\beta}{F + R\cos\beta} - \Delta, \beta, R\right).$$
(8)

En tenant compte de D = F + R (i = 0), nous pouvons mettre la relation (8) sous forme non dimensionnelle

$$\frac{d}{R} = \frac{(F/R+1)\sin\beta}{F/R+\cos\beta} - \Delta, \beta = \frac{p}{R} - \Delta, \beta.$$
(9)

Pour de petites valeurs de β , la relation (9) devient

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{R}} = 2(\beta - \Delta, \beta). \tag{10}$$

Le flou est donc nul quand le synchronisme est parfait.

3.6. Formule complète

Précédemment, nous avons supposé i nul et posé D = F + R. En réalité D = F + R + i et la formule (9) devient

$$\frac{d}{R} = 2 \left(\frac{(F/R+1)\sin\beta}{\cos\beta + F/R} - \Delta \cdot \beta \right) + 2 \frac{i/R \sin\beta}{\cos\beta + F/R} \cdot I$$
I II

Pour $\Delta = 1$, le terme I est négatif, tandis que II est positif. L'augmentation de i constituerait donc un des moyens de diminuer le flou. On peut évaluer les valeurs extrêmes que peut prendre le terme II en fonction des limites expérimentales que nous nous imposons.

Pour des valeurs de i comprises entre 2 et 10 mm on fait les constatations suivantes:

a). Le flou géométrique est multiplié par un facteur voisin de 3.

b) Dans les différents cas, le flou géométrique est de plusieurs ordres de grandeur supérieur à l'amélioration apportée par i.

Il apparaît donc préférable de conserver à i les valeurs les plus petites possibles, compatibles avec les conditions mécaniques.

3.7. Flou d'une couche interne

La synchronisation est assurée en prenant comme référence une couche cylindrique de rayon R. Nous considérons une couche de rayon $r = \gamma R$. A partir de la relation (5), nous calculons la longueur du segment projeté par le mouvement d'un point de la couche r. On a

$$p_r = \frac{D \sin \beta}{\cos \beta + F/R. 1/\gamma}$$

et le flou correspondant a pour valeur réduite

$$\frac{d_{r}}{R} = \frac{(F/R+1)\sin\beta}{\cos\beta + F/R.1/\gamma} - \Delta.\beta.$$
(11)

Pour de petites valeurs de β , $p_r \simeq \gamma p_R$ et

$$\frac{d_{r}}{R} = \gamma p_{R} - \Delta, \beta.$$
(12)

On voit, dans ce dernier cas, que le flou d'une couche est fonction linéaire de γ , c'est-à-dire de l'éloignement à la couche de référence. De plus la netteté optimale d'une couche s'obtient en synchronisant cette couche, ce qui recoupe les résultats précédents.

3.8. Effet de focalisation

Le tableau I donne les valeurs réduites du flou pour les valeurs extrêmes de β et de F/R, et pour différentes valeurs de γ .

On remarque un effet de focalisation, c'est-à-dire de flou, rapidement croissant pour des couches s'éloignant de la couche de rayon R. Il est donc <u>a priori</u> possible, pour des tubes épais ou même des barres, de rendre nette l'image d'une couche déterminée et d'estomper les autres. L'effet sera plus sensible pour de grandes valeurs de β et de F/R.

3.9. Traitement numérique

L'exploitation de la méthode rendait souhaitable l'établissement de tables donnant les valeurs de p en fonction de β ainsi que l'effet sur le flou de différents asynchronismes.

Le nombre de paramètres en présence nous a obligé à recourir à la programmation par ordinateur. Les conclusions exposées ci-dessous ont d'ailleurs été utilisées précédemment.

TABLEAU I

F/R	β≈14°		β=4°	
Y	5	70	5	70 .
0,8	-0,086	-0,1006	-0,024	-0,028
0,9	-0, 043	-0,0524	-0,012	-0,014
1	-0,0024	-0,0047	-0,00006	-0,0001
1, 1 _.	+0,038	+0,0431	0,011	0,016
1, 2	+0,077	-0,0906	0,023	0,030

VALEURS DE d, /R

La formule simplifiée (8) nous a donné les valeurs de d/R en fonction de β pour différentes valeurs des paramètres et de F/R. De plus les courbes tracées par ordinateur mettent en lumière l'essentiel des phénomènes.

La figure 12 illustre, pour F/R, un réseau de courbes correspondant à différents asynchronismes. On constate que

- la courbe ($\Delta = 1$) correspondant au synchronisme est tangente à l'origine à l'axe des β ;



Figure 12

Réseau de courbes tracé par ordinateur. Les valeurs lues sont à multiplier par 10.

- les avancements plus rapides du film ($\Delta < 1$) conduisent à des flous plus importants et sont donc sans intérêt;
- les avancements plus lents ($\Delta > 1$) présentent des maxima et des racines pour des angles pouvant être très importants. Pour des angles compris entre le maximum et la racine, le flou à considérer est donc le flou maximal.

Nous avons tracé (fig. 13) des courbes de d/R en fonction de l'asynchronisme pour F/R = 5 et F/R = 70. Entre parenthèses, on lit les angles β correspondant à la racine et au maximum. A même hauteur, sur l'axe $\Delta = 1$, sont relevés les angles conduisant à un flou égal pour un déphasage nul.

On constate que

- les variations dues à la distance focale (F/R) sont très réduites;
- les flous maximaux augmentent rapidement en fonction de l'asynchronisme et prennent alors des valeurs inacceptables, du moins pour les grands diamètres;
- à flou égal, l'asynchronisme ($\Delta < 1$) conduit à des angles sensiblement plus importants que le synchronisme ($\Delta = 1$).

Néanmoins, si l'on désire une qualité d'image élevée, les grands angles sont sans grand intérêt pratique et nous avons décidé de nous limiter à $\beta = 15^{\circ}$.



Figure 13

Courbes de d/R_{max} pour 0, 927 < Δ < 1. Entre paranthèses l'angle correspondant au flou maximum et l'angle d'annulation, c'est-à-dire l'angle maximal utilisable; sur l'axe des d/R, angles donnant le flou indiqué à déphasage nul.





Réseau de courbes établi selon les mêmes principes que celui de la figure 12, mais pour des déphasages plus réduits,



Figure 15 Courbes des d/R_{max} pour 0, 98 < ∆<1.

Les remarques suivantes s'imposent, à propos de ces figures:

- ici également, la distance focale a peu d'influence;

- la valeur du flou est plus acceptable;

- l'avantage de l'asynchronisme sur la largeur de $\hat{\beta}$ est encore sensible.

On peut donc conclure que, pour des angles limités à 15° et de faibles épaisseurs (e < R/10), un variateur de synchronisme ne s'impose pas. Deux valeurs de Δ : 0,99 et 1, produites par le changement d'une poulie, sont suffisantes.

3.10. Valeurs de p

On a vu au paragraphe 3.2. que les largeurs de fente $2p_1$ et $2p_2$ sont proportionnelles à p. D'autre part, la programmation de la formule simplifiée (8) nous donne les valeurs de $2p_3$ (fig. 11) assimilées à 2p par la supposition que i est nul.

Le tableau II donne les valeurs de 2p en fonction de β et de F/R et permet donc, par une règle de trois, de fixer la largeur des fentes à la valeur voulue.

L'on voit que p croît de façon quasi linéaire en fonction de β et est pratiquement insensible aux variations de la distance focale. Pour les angles envisagés, les fentes ne doivent donc pas être réajustées lorsque la distance focale varie.

3.11. Illustration

Quelques clichés ont pu être pris grâce au prototype que montre la figure 16. Cet appareil ne comporte pas de variateur de vitesse et les clichés ont donc été pris au synchronisme $\Delta = 1$.

TABLEAU II

VALEURS	$_{\rm DE}$	2p
---------	-------------	----

F/R β	5	20	50	70	Ecart maximal dû à F/R
1	3,491·10 ⁻²	3,491 · 10 ⁻²	3,490·10 ⁻²	$3,490\cdot 10^{-2}$	0,001 · 10 ⁻²
5	1,744·10 ⁻¹	1, 743 · 10 ⁻¹	1,743·10 ⁻¹	1,743·10 ⁻¹	0,001·10 ⁻¹
10	3,482·10 ⁻¹	3,475 · 10 ⁻¹	3,474 · 10 ⁻¹	$3,474 \cdot 10^{-1}$	0,008·10 ⁻¹
15	5,206·10 ⁻¹	5,185·10 ⁻¹	5,180·10 ⁻¹	5,179·10 ⁻¹	0,017·10 ⁻¹
20	6,910·10 ⁻¹	6,860·10 ⁻¹	6,848·10 ⁻¹	6,846·10 ⁻¹	0,064·10 ⁻¹
25	8,586·10 ⁻¹	8,490 · 10 ⁻¹	8,468 · 10 ⁻¹	8,464 · 10 ⁻¹	0,122.10-1





La figure 17 est la radiographie par roulement d'un tube à ailettes. On remarquera les traits blancs correspondant aux ailettes principales. Les zones blanches correspondent au passage des mêmes ailettes sur la face antérieure. De petits trous de différentes profondeurs pratiqués à différentes profondeurs entre deux ailettes se traduisent de la même manière par des points noirs et des traits gris perpendiculaires au sens du défilement.

La figure 18 est l'image développée de la paroi d'un tube en SAP de 96 mm de diamètre externe; sur l'original, des trous de 0,1 mm sont clairement visibles. Ce cliché a été pris avec une ouverture $\beta = 5^{\circ}$.

Ces deux radiographies permettent, nous semble-t-il, de conclure à une applicabilité pratique de la méthode.

4. CONCLUSIONS

Les deux méthodes décrites sont sensiblement plus lentes que l'exposition statique traditionnelle. Cet inconvénient pourrait être diminué de façon sensible par la radiographie simultanée de plusieurs tubes. Elles fournissent d'autre part une image de qualité proche de l'image d'une plaque plane d'épaisseur équivalente.



Figure 17

Radiographie par roulement d'un tube en SAP à 36 ailettes de refroidissement et 3 ailettes d'espacement plus longues. Diamètre interne: 25,5 mm.





Radiographie d'un tube de force en SAP. Diamètre externe: 96 mm. Epaisseur : 3 mm.

Les domaines spécifiques d'application se recouvrent largement, néanmoins on peut exprimer les préférences suivantes:

La radiographie rotative s'utilisera surtout dans le cas de tubes d'un diamètre voisin de 100 mm, quand on désire un contraste plus élevé ou une image plus nette de la paroi interne.

La radiographie par roulement sera choisie pour des tubes de plus petit diamètre et d'épaisseur diverses, et dans les cas où le contraste peut être quelque peu sacrifié à la simplicité de manipulation du film et à une rapidité plus grande. Ce procédé semble donc idéal pour la radiographie de tubes à ailettes.

7*
REMERCIEMENTS

Il nous est agréable de mentionner ici avec reconnaissance les précieux conseils que nous avons reçus de notre collègue M.A. Hubeaux, qui a conçu et rédigé les deux programmes pour ordinateur.

Nous remercions également M.P. Mandrier, qui a mis au point les prototypes et procédé aux expérimentations, et MM. Gadda, Rossetti et Romer, qui ont dessiné les dispositifs mécaniques.

DISCUSSION

R. SHARPE: In tube inspection the detection of fine cracks is important I should be surprised if the unsharpness introduced by your rotation technique gave sufficient sensitivity to detect this type of defect.

J. C. JANSEN: The unsharpness is close to calculated values, and the method allows detection of cracks of lateral dimensions compatible with these values. We do not think these methods are inferior to standard exposures through two walls.

V. V. GORSKY: Have you detected cracks under the fins on the inner wall of the tube? I do not think the sensitivity of your method is sufficient to detect cracks with a depth of less than 10% of the tube wall-thickness.

J.C. JANSEN: We have detected artificial defects of 10% and less, situated to the right of the fins. Obviously, the thickness traversed in such cases is two or even three times as great as the wall thickness. Further experience with the procedure will enable us to determine more accurately the limitations of the method with regard to real cracks.

CONTRÔLES NON DESTRUCTIFS DE BARREAUX COMBUSTIBLES ENRICHIS AU PLUTONIUM*

P. LIBOTTE, H. INNIGER ET J.M. LEBLANC CENTRE D'ÉTUDE DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE, SOCIÉTÉ BELGE POUR L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE, S.A. (BELGONUCLÉAIRE), MOL, BELGIQUE

Abstract — Résumé — Аннотация — Resumen

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF PLUTONIUM-ENRICHED FUEL RODS. The Société Belge pour L'Industrie Nucléaire (BelgoNucléaire) and the Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire (C.E.N.) are conducting a study under contract and in collaboration with the Commission of EURATOM on the use of plutonium in pressurizedwater power reactors. During these investigations a number of non-destructive testing techniques have been developed for assessing the quality of the fabricated fuel rods.

The non-destructive testing techniques described in the paper are used primarily for checking the dimensions and quality of fuel-element cladding tubes, the integrity of welds, the leak-tightness of the rods, the density and distribution of the fuel, and plutonium enrichment and radial and axial distribution in the fuel rod.

The principal non-destructive testing methods used are radiography, autoradiography, gamma-radiography and ultrasonics. The authors discuss the principle underlying each procedure and describe the equipment used, together with the techniques applied in each case to obtain the required sensitivity and accuracy.

With the radiography technique, flaws of the order of 50-60 μ m in the end-cap welds of fuel elements can be detected.

Since the fuel consists of three high-density powder fractions compacted by vibration, with only the fine fraction comprising the plutonium enrichment, it is essential to measure accurately the distribution of the plutonium and the density distribution. By counting the gamma-radiation emitted by the plutonium it is possible to find the longitudinal distribution of the latter with an accuracy of better than $\pm 2\%$ in the case of perfect radial distribution; the last-named is usually determined by exposure on photographic emulsion. The axial distribution of the fuel density is determined with an accuracy of better than $\pm 1\%$ by measuring the non-absorbed fraction of gamma-radiation emitted by an external source, either Cs¹³⁷ or lr¹⁹². Cracks of around 10 μ m can be detected ultrasonically by the pulse-echo technique.

The respective advantages of the various non-destructive techniques are studied in relation to the required accuracy and to their possible application to the automated inspection of plutonium fuel rods fabricated on an industrial scale.

CONTRÔLES NON DESTRUCTIFS DE BARREAUX COMBUSTIBLES ENRICHIS AU PLUTONIUM. La Société belge pour l'industrie nucléaire (BelgoNucléaire) et le Centre d'étude de l'énergie nucléaire (CEN) étudient sous contrat, en coopération avec la Commission de l'EURATOM, l'utilisation du plutonium dans les réacteurs de puissance à eau pressurisée. Dans le cadre des recherches entreprises, différentes techniques de contrôle non destructif ont été mises au point en vue d'évaluer la qualité des barreaux combustibles fabriqués.

Les essais non destructifs mis au point et décrits dans le mémoire sont utilisés essentiellement pour le contrôle des dimensions et de la qualité des tubes de gainage, de l'intégrité des soudures, de l'étanchéité des barreaux, de la densité du matériau combustible et de sa répartition, de l'enrichissement en plutonium et de sa distribution radiale et axiale dans le barreau combustible.

Les méthodes utilisées pour ces essais non destructifs comportent principalement les examens par radiographie, par autoradiographie, par gammagraphie et par les ultrasons. Le document reprend le principe de chacune des mesures réalisées, et décrit dans chaque cas l'appareillage utilisé et les techniques opératoires appliquées en vue d'obtenir les sensibilités et précisions désirées.

La technique utilisée pour la radiographie permet de déceler des défauts de l'ordre de 50 à 60 µm dans les soudures d'extrémité des barreaux combustibles.

^{*}Travail réalisé en coopération entre la commission de l'EURATOM. le Centre d'étude de l'énergie nucléaire et la Société belge pour l'industrie nucléaire dans le cadre de l'accord de coopération EURATOM/ Etats-Unis.

P. LIBOTTE et al.

Les combustibles étant densifiés par vibration de trois fractions de poudre dense, dont la fraction fine seule comporte l'enrichissement en plutonium, il est essentiel que la répartition de ce dernier, de même que la distribution de la densité, soient relevées avec précision. Le comptage du rayonnement gamma émergent émis par le plutonium permet de connaître la répartition longitudinale de celui-ci avec une précision supérieure à. $\pm 2\%$ dans le cas d'une répartition radiale parfaite, cette dernière étant évaluée principalement par exposition sur émulsion photographique. La distribution axiale de la densité du matériau combustible est déterminée avec une précision supérieure à $\pm 1\%$ par mesure de la fraction non absorbée d'un rayonnement gamma émis par une source extérieure: ¹³⁷Cs ou ¹⁹²Ir. Des fissures de l'ordre de 10 µm peuvent être détectées par ultrasons en utilisant la technique de réflexion des ondes.

Les avantages respectifs de chaque technique non destructive sont étudiés en relation avec les précisions désirées et leur éventuelle application au contrôle automatisé de barreaux combustibles au plutonium fabriqués à l'échelle industrielle.

НЕДЕСТРУКТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ТОПЛИВНЫХ СТЕРЖНЕЙ ОБОГАЩЕННЫХ ПЛУ-ТОНИЕМ. Бельгийское общество ядерной промышленности и Исследовательский ядерный центр проводят по контракту в сотрудничестве с Комиссией Евратома исследования в области применения плутония в энергетических реакторах с водой под давлением. В рамках предпринятых исследований разработаны различные методы контроля без разрушения образца для определения качества изготовленных топливных стержней.

Разработанные и описанные в докладе опыты без разрушения образца используются, главным образом, для того, чтобы контролировать размеры и качество оболочек топливных стержней, качество сварки, герметичность стержней, плотность топливного материала и его распределение, обогащение плутонием и его радиальное и осевое распространение в топливном стержне.

Методы, примененные для опытов, состоят в основном из исследований с помощью радиографии, радиоавтографии, гаммаграфии и ультразвуков. Излагается принцип каждого из проведенных измерений, для каждого случая дается описание аппаратуры и эксплуатационных методов, примененных для получения желаемой чувствительности и точности.

С помощью радиографии метод позволяет обнаруживать трещины от 50 до 60 микрон на сварках концов топливных стержней.

Поскольку топливо уплотняется вибрацией трех частей плотного порошка, из которых только мелкая часть несет в себе обогащение плутонием, то важно, чтобы распределение последнего и распределение плотности было точно установлено. Отсчет выходящего гаммаизлучения плутония позволяет определить продольное распространение последнего с точностью выше ±2% в случае совершенно радиального распределения, а оно определяется главным образом облучением фотоэмульсии. Осевое распределение плотности топливного материала устанавливается с точностью выше ±1% путем измерения непоглощенией фракции гаммаизлучения от внешнего источника, т.е. цезия-137 или иридия-192. Трещины размером 10 микрон могут быть обнаружены с помощью ультразвуков методом отражения волн.

Относительные преимущества каждого из методов без разрушения исследуются с учетом желаемой точности и их возможного применения для автоматического контроля за топливны~ ми стержнями с плутонием, которые были изготовлены в промышленности.

ENSAYO NO DESTRUCTIVO DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES ENRIQUECIDOS EN PLUTONIO. La Société Belge pour l'Industrie Nucléaire (BelgoNucléaire) y el Centre d'étude de l'énergie nucléaire (CEN) estudian por contrato, y en cooperación con la Comisión del EURATOM, el empleo del plutonio en reactores de potencia de tipo agua a presión. En el marco de los estudios emprendidos, se han desarrollado varias técnicas de ensayo no destructivo, con miras a evaluar la calidad de los elementos combustibles.

Los ensayos no destructivos descritos en la presente memoria se emplean fundamentalmente para controlar las dimensiones y la calidad de las vainas, la integridad de las soldaduras, la estanqueidad de los elementos, la densidad del material combustible y su distribución, el enriquecimiento de plutonio y su distribución, tanto radial como axial, en el elemento combustible.

Los métodos utilizados para estos ensayos no destructivos comprenden principalmente inspección por radiografía, autorradiografía, gammagrafía y el empleo de ondas ultrasónicas. La memoria roseña los principios a que obedece cada una de las mediciones, describe en cada caso los aparatos utilizados y las técnicas operativas aplicadas con miras a obtener la sensibilidad y la precisión deseadas.

La técnica radiográfica utilizada permite poner de manifiesto defectos del orden de 60 a 60 μ m en las soldaduras extremas de los elementos combustibles.

CONTRÔLES NON DESTRUCTIFS

De las tres fracciones de polvo denso con las que se compactan por vibración los combustibles, sólo la fracción fina está enriquecida en plutonio. Por consiguiente, es fundamental determinar con exactitud la repartición de este último, como también la distribución de densidades. La medición de la radiación gamma emitida por el plutonio permite conocer con precisión superior a $\pm 2\%$ la distribución de éste en sentido longitudinal cuando la distribución radial es perfecta; esta última se evalúa principalmente por exposición sobre una emulsión fotográfica. La distribución axial de la densidad del material combustible se determina con precisión superior a $\pm 1\%$ midiendo la fracción no absorbida de los rayos gamma emitidos por una fuente externa, por ejemplo ¹³⁷Cs, o bien ¹³²Ir. Aplicando la técnica de reflexión de ondas ultrasónicas, es posible detectar fisuras del orden de 10 μ m.

Se estudian en la memoria las ventajas de cada una de las técnicas no destructivas, referidas a la precisión deseada y a su posible aplicación al control automático de los elementos combustibles plutoníferos, elaborados en escala industrial.

1. INTRODUCTION

En vue de vérifier la qualité des barreaux fabriqués et leur bon comportement en cours d'irradiation, de nombreux contrôles sont réalisés sur les matériaux mis en œuvre (gainages, bouchons, matériaux combustibles), de même que sur les barreaux combustibles finis. Etant donné le coût élevé de ces contrôles, les techniques adoptées sont, dans la plupart des cas, non destructives et, dans la mesure du possible, rendues automatiques.

Les techniques non destructives couramment appliquées dans les laboratoires CEN — BelgoNucléaire pour le contrôle des barreaux combustibles enrichis au plutonium sont décrites dans ce mémoire. Elles sont fondées sur le fait que ces combustibles sont fabriqués par vibration ou vibration — rétreinte d'un mélange de poudres denses d'oxyde d'uranium et de plutonium.

2. CONTRÖLE DU GAINAGE

Le contrôle des dimensions et de l'intégrité des gaines peut se faire, soit avant fabrication, soit sur les combustibles finis. Toutefois, afin de réduire le pourcentage de barreaux combustibles défectueux et pour autant que les gaines ne subissent aucune sollicitation importante au cours de la fabrication, il est avantageux que ce contrôle soit réalisé préalablement.

2.1. Contrôles dimensionnels

2.1.1. Mesure de l'épaisseur des gaines

Le contrôle de l'épaisseur est effectué en continu par ultra-sons à l'aide d'un appareil «Branson Vidigage» qui utilise le principe de la résonance.

Le calibrage de l'appareil a été réalisé à l'aide d'échantillons d'épaisseurs variables (0,3-0,5 mm) mesurées avec une précision de $\pm 2 \mu m$. D'après ces étalonnages, il est possible de contrôler, au moyen de l'appareillage mentionné, l'épaisseur des gaines de barreaux combustibles avant ou après fabrication de ceux-ci, avec une précision de l'ordre de $\pm 2\%$ de l'épaisseur mesurée.

P. LIBOTTE et al.

Le dispositif mécanique d'avancement du barreau consiste en un système de rouleaux. L'angle qu'ils forment avec la direction d'avancement du tube à contrôler est variable, de sorte qu'on peut modifier la vitesse de translation par rapport à la vitesse de rotation. Ce dispositif permet ainsi de contrôler l'épaisseur du tube suivant toutes les génératrices.

L'automatisation de ce contrôle est en cours de réalisation. Elle consiste à placer deux cellules photoélectriques devant l'écran, en face des positions correspondant aux épaisseurs limites fixées par les spécifications. La réception d'un faisceau lumineux par l'une des cellules entraînera l'inscription d'une marque à l'endroit défectueux.

2.1.2. Mesure du diamètre extérieur

Ce contrôle se fait d'une manière discontinue à l'aide d'un comparateur «Mikrokator Johansson» calibré au moyen de cales-étalons. La mesure peut être effectuée avec une précision de $\pm 3 \ \mu m$.

2.2. Détection des défauts

Diverses méthodes de détection de fissures ont été mises au point. Elles utilisent, soit les techniques de la réplique en latex pour détecter les fissures internes des tubes vides, soit les pénétrants fluorescents pour détecter les fissures externes, soit les ultrasons, pour détecter les deux types de fissures dans les tubes vides et les barreaux combustibles.

2.2.1. Les répliques en caoutchouc

Le principe de ce contrôle * consiste à introduire du latex stabilisé dans le tube à tester. Après chauffage, la pellicule de latex de 1 mm d'épaisseur est extraite et examinée à l'oeil nu ou au binoculaire. La réplique ainsi obtenue permet de déceler la présence, sur la surface interne des tubes, de microfissures de profondeurs voisines de 5 μ m.

Les temps inacceptables d'extraction de la pellicule lorsque la longueur du tube dépasse un mètre ainsi que l'impossibilité d'automatiser le système rendent cette technique peu avantageuse pour la fabrication industrielle. Toutefois, ce contrôle est particulièrement intéressant pour caractériser des défauts décelés par d'autres techniques ou pour le contrôle détaillé des tubes destinés à des essais spéciaux d'irradiation.

2.2.2. Les pénétrants fluorescents

Le principe de ce contrôle est connu. En appliquant le mode opératoire mis au point, des microfissures de $10 \ \mu m$ peuvent être décelées à la surface externe des tubes de gainage. Cette technique de contrôle est aisée; toutefois, une attention particulière doit être portée sur les composés chimiques utilisés, afin qu'après contrôle du barreau combustible, aucune impureté

^{*} ALFILLE, L., AZAM, M. et FIGNON, M., Application de la technique de «réplique totale» à la détection de défauts sur la surface intérieure des tubes, Rev. Métall. 5 (mai 1961) 429-36.

CONTRÔLES NON DESTRUCTIFS





OSCILLOSCOPE



Détection des fissures par ultrasons.

présente dans les petites fissures n'altère le bon comportement du combustible en cours d'irradiation.

2.2.3. Les ultrasons (fig. 1 et 2)

La technique consiste à envoyer dans le tube en rotation autour de son axe un faisceau d'ondes ultrasonores de circonférence. Etant donné la faible épaisseur de paroi, une onde de Lamb est le mode de propagation le plus probable. A un signal d'envoi correspondent plusieurs échos fixes dus aux différents passages de l'onde sur le palpeur. Si l'onde rencontre une fissure, celle-ci la réfléchit et un signal mobile supplémentaire est perçu sur l'oscilloscope, étant donné que la fissure tourne avec le tube et que, par conséquent, la distance palpeur - fissure varie.

L'appareillage comporte un oscilloscope Lehfeld, type Echoskop, un palpeur d'angle, un système de translation et de rotation des tubes et un dispositif de support du palpeur et d'accouplement palpeur-barreau.

Le contrôle est effectué en continu. Les tubes sont supportés par un système de rouleaux qui leur communique un mouvement hélicoidal. Le pas du déplacement est variable de manière à adapter la vitesse de défilement au diamètre du barreau.

L'angle d'entrée des ondes ultrasonores dans le tube est de 80°; la fréquence utilisée est de 2 MHz. La transmission des ondes ultrasonores depuis le palpeur jusqu'au barreau est réalisée par l'intermédiaire d'un film d'huile dont l'épaisseur est de quelques dixièmes de millimètre. Une vanne à aiguille assure un débit d'huile constant.



Figure 2

Appareillage ultrasons pour la détection des fissures.

L'interprétation du contrôle est très aisée, puisque de la seule observation d'un pic mobile sur l'écran de l'oscilloscope, on peut conclure à la présence d'un défaut. Par ailleurs, l'apparition de pics fixes témoigne de la réalisation correcte du contrôle. La hauteur d'un pic correspondant à un défaut est proportionnelle à la section du défaut située dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation des ondes. Le calibrage préalable de l'installation permet d'affirmer que le seuil de détection correspond à un défaut de section égale à 0.05 mm^2 . Par conséquent, détecter par exemple des fissures de 5 mm de longueur ayant une profondeur de $10 \ \mu \text{m}$ n'offre aucune difficulté.

L'automatisation de ce contrôle est en cours de réalisation. Elle consiste à capter le signal mobile dont l'amplitude est enregistrée.

3. CONTRÔLE DES SOUDURES

Le contrôle des soudures est effectué suivant différentes techniques. Chacune de celles-ci contribue séparément à évaluer la qualité des soudures obtenues.

3.1. Contrôle de l'étanchéité

Le contrôle de l'étanchéité des soudures des barreaux combustibles enrichis au plutonium se fait à deux étapes différentes de la fabrication. Un premier contrôle rapide est réalisé dans une boîte à gants, directement après la soudure des bouchons; le second, plus précis, est effectué après décontamination finale des barreaux. La raison d'un tel processus est essentiellement économique. Elle a pour effet d'éliminer le plus tôt possible les barreaux défectueux et d'éviter, par conséquent, des opérations ultérieures inopportunes, telles que décontamination, nettoyage, etc.

a) Lors du premier contrôle, le barreau combustible est plongé dans un bac horizontal contenant du glycol au-dessus duquel un vide de l'ordre de 15 mm Hg est ensuite créé. Une fuite éventuelle est décelée par une succession de bulles s'échappant du barreau. Le seuil de sensibilité est évalué à une fuite de débit égale à 10^{-2} cm³ · atm/s.

b) Le second contrôle effectué après décontamination est réalisé par ressuage d'hélium. Le barreau combustible préalablement décapé et dégraissé est immergé dans l'hélium pendant une heure sous une pression de 20 kg/cm². Après immersion, le barreau est placé durant 15 minutes dans une enceinte de ressuage où un vide de $5 \cdot 10^{-2}$ mm Hg est créé. L'enceinte de ressuage est ensuite connectée au détecteur qui définit l'importance de la fuite éventuelle. La durée de ressuage a été fixée de telle sorte qu'à une fuite étalon de $5 \cdot 10^{-10}$ cm³ \cdot atm/s ressuant dans les mêmes conditions corresponde un signal de 1000 μ A sur le cadran de mesure du détecteur. (La saturation de l'appareil correspond à un signal de 4000 μ A).

Le seuil de rebut est fixé à une fuite de $5 \cdot 10^{-10}$ cm³ · atm/s, soit à un signal de 1000 μ A auquel il y a lieu d'ajouter le bruit de fond. Celui-ci est déterminé en faisant subir à un tube vide la suite des opérations effectuées pour contrôler les combustibles finis. Si dans la plupart des cas ce bruit de fond est négligeable, il doit toutefois être établi lors du contrôle de combustibles dont la surface extérieure du gainage serait de finition plus grossière.

3.2. Contrôle radiographique

Il est couramment admis que la radiographie X permet de déceler des défauts de l'ordre de 2 à 3% de l'épaisseur totale traversée. Par conséquent, pour des soudures de bouchons massifs sur des tubes de 0,5 mm d'épaisseur et de 8,5 mm de diamètre extérieur, par exemple, des défauts minimaux de l'ordre de 200 μ m pourraient être détectés par cette méthode. Par ailleurs, la profondeur de pénétration de la soudure devant, suivant les cas, être de l'ordre de 0,5, 0,6 ou 0,7 mm, la radiographie X ne décèlerait que des défauts égaux à la moitié ou au tiers de la profondeur du cordon de soudure. L'intérêt, dans ce cas, d'un tel contrôle serait par conséquent très faible.

C'est dans cet ordre d'idées que de multiples essais ont été effectués en vue d'améliorer la technique du contrôle radiographique. Des bouchons pleins, comportant des rainures triangulaires sur la circonférence d'une profondeur respective de 300, 250, 200, 150, 110, 100, 90, 80, 70, 60, 50 et 40 μ s, ont été introduits dans des tubes de 8,5 mm de diamètre extérieur et de 0,5 mm d'épaisseur de paroi. Les conditions de pose ont été choisies telles que la meilleure sensibilité du contrôle soit obtenue à l'endroit où l'épaisseur de métal traversée par les rayons X est minimale. Le défaut triangulaire de 60 μ m de profondeur a pu être aisément décelé.

Sur la base de ces essais, la totalité du cordon de soudure d'un barreau combustible est contrôlée par radiographie en prenant soit six, soit neuf clichés, le barreau subissant une rotation soit de 30°, soit de 20° après chaque pose. Le bouchon rainuré de référence (profondeur: $60 \ \mu m$) enfoncé dans le tube est radiographié en même temps que les barreaux à contrôler et témoigne du fait que les paramètres optimaux ont été respectés.

Le contrôle radiographique du cordon de soudure ne peut pas encore être considéré comme un contrôle absolu; néanmoins, la probabilité de détection d'une soudure défectueuse a très nettement été augmentée par l'application du processus décrit ci-dessus.

4. CONTRÔLE DE LA RÉPARTITION DE LA DENSITÉ

4.1. Principe

Le principe de la technique consiste à collimater un faisceau de rayonnements gamma émis par une source extérieure et à mesurer la variation de l'intensité de ce rayonnement après que celui-ci a traversé le combustible à contrôler. L'intensité du faisceau émergent étant une fonction de la densité du matériau, l'enregistrement de cette intensité donne directement la variation de la densité.

4.2. Choix de l'émetteur gamma

Le choix de l'émetteur gamma est conditionné d'une part par la recherche d'une sensibilité de mesure élevée, et d'autre part par la nécessité pratique de contrôler, à l'aide d'un même appareil, des barreaux combustibles dont les diamètres, compris entre 6 et 16 mm, se traduisent par des propriétés d'absorption très différentes.

Les barreaux à contrôler ayant une densité voisine de 9 à 10 g/cm³, les émetteurs gamma susceptibles de fournir une sensibilité de mesure acceptable sont ceux dont l'énergie est comprise entre 300 et 700 keV.

Le ¹⁹⁹Ir et le ¹³⁷Cs ont été retenus en raison des fortes activités spécifiques disponibles, grâce auxquelles il est possible d'utiliser des sources de faibles dimensions ne présentant pas d'auto-absorption. Ces deux isotopes permettent de réaliser un faisceau étroitement collimaté et, par conséquent, de mesurer des variations de densité sur une faible longueur de barreau.

La courte période de ¹⁹²Ir (74 j) rend nécessaire le remplacement fréquent de la source et complique l'étalonnage de l'appareil; c'est la raison pour laquelle l'isotope choisi est le ¹³⁷Cs qui s'adapte le mieux aux travaux de routine.

4.3. Dispositif d'exploration et appareillage de détection

Les barreaux à contrôler sont déposés dans une gouttière profilée et sont entraînés par des galets à friction en forme de diabolo. Le faisceau gamma est collimaté par du plomb de 50 mm d'épaisseur et 4 mm de diamètre. Le centrage des barreaux au-dessus de la source est assuré par des bagues de nylon.

L'appareillage de détection est constitué par une chaîne spectrométrique manuelle classique suivie d'un amplificateur à courant continu comprenant un système de remise à zéro, et par un enregistreur graphique.



Figure 3

Contrôle de l'homogénéité de la densité par gammagraphie d'un barreau combustible.

La chaîne spectrométrique comporte un photoscintillateur équipé d'un cristal NaI (Tl) de 1×1 pouce, un préamplificateur, un amplificateur linéaire analyseur et un dérivateur linéaire avec alimentation à très haute tension incorporée. Cet ensemble est caractérisé par sa stabilité et son faible temps de résolution (0,5 μ s).

4.4. Calibrage et résultats (fig. 3)

Le calibrage consiste à déterminer pour un diamètre de combustible donné l'échelle de l'enregistrement de la mesure effectuée, soit l'équivalence d'un centimètre en pourcentage de la densité théorique. Dans le cas de combustible céramique à oxyde, ce calibrage est réalisé à l'aide de pastilles d'UO₂ de densité connue et parfaitement rectifiées. La précision des mesures de variation de densité dépend essentiellement des fluctuations statistiques de la source. Celles-ci constituent une constante de l'appareil et sont d'environ de 0,5% DT (densité théorique). Le contrôle est effectué en continu; il peut aisément être automatisé.

5. DÉTERMINATION DE LA CONCENTRATION EN PLUTONIUM ET DE SA RÉPARTITION

5,1, Principe

La technique consiste à compter, sur une longueur prédéterminée du barreau combustible, l'intensité des rayons gamma (384 keV) émis par le ²³⁹Pu. L'activité gamma étant une fonction de la concentration en plutonium, les écarts de chaque mesure par rapport à la moyenne des comptages réalisés donnent les variations d'enrichissement. Le taux moyen de comptage est une fonction de la quantité totale de plutonium présent.

Lors du contrôle de combustibles à UO_2 enrichis au plutonium, il est tenu compte du bruit de fond dû à l'uranium en déduisant les taux de comptage obtenus lors de mesures réalisées dans les mêmes conditions sur des barreaux à UO_2 seul.



Figure 4

Appareillage pour le contrôle gammagraphique de la concentration en plutonium et de sa répartition.

5.2. Appareillage (fig. 4)

Quatre photoscintillateurs équipés d'un cristal NaI de 2×2 pouces sont disposés en croix autour du barreau à contrôler. L'installation de mesure comprend un préamplificateur-mélangeur à quatre entrées, un châssis répartiteur de haute tension, un amplificateur analyseur, un compteur automatique et une machine imprimante.

L'analyseur sélectionne les rayons de 384 keV. Il a été étalonné à l'aide de sources d'énergie connue et d'une pastille de PuO_2 pur de même composition isotopique que le plutonium contenu dans les barreaux à contrôler. Etant donné que le rayonnement de 384 keV est peu abondant, la mesure est réalisée suivant un comptage pas à pas. Une unité d'automatisation coordonne le travail du système d'avancement et de l'appareil de comptage. Le barreau combustible, déposé dans une gouttière profilée, est poussé par un linguet solidaire d'un écrou actionné par une vis sans fin.

Le collimateur est constitué par une fente de largeur réglable (0 à 50 mm) pratiquée dans un bloc cubique en plomb. L'épaisseur du collimateur est fixée par la participation des rayons gamma de 384 keV émis par la partie non examinée du barreau que l'on accepte d'admettre pour le comptage total. Dans le cas présent, à une épaisseur de 40 mm de plomb correspond une incidence relative de 0,1% pour une fente de 0,5 cm dans le collimateur et un cristal de 2×2 pouces.

La conception de cet appareil permet

a) d'améliorer le rendement du comptage en présentant un bon compromis entre un cristal cylindrique qui est la solution idéale au point de vue rendement géométrique du comptage et la possibilité de contrôler des barreaux de différents diamètres; b) d'atténuer l'effet d'auto-absorption du rayonnement gamma émis par le plutonium;

c) une grande mobilité dans la technique de mesure du fait des possibilités de variation de la largeur du collimateur (1 à 50 mm) et du taux d'avancement discontinu des barreaux (1 à 20 mm).

5.3. Evaluation des résultats

5.3.1. Erreur statistique due au comptage

L'erreur statistique introduite lors du comptage est égale à K \sqrt{N} . Dans cette formule, K représente le coefficient lié au facteur de méfiance. Ce coefficient peut être choisi égal à 1 ou 2 suivant que l'on désire que la probabilité d'inclure le taux de comptage moyen dans la zone d'erreur N \pm K \sqrt{N} soit de 68 ou de 95%. En ce qui concerne le contrôle en cause, un facteur de confiance égal à 95% est utilisé pour les mesures de routine.

Pour une configuration géométrique donnée de l'installation, la durée de la mesure est ainsi fixée par l'erreur statistique admise. Il est possible de réduire le temps de mesure en augmentant le nombre de coups. Ceci peut être obtenu en utilisant une ouverture de collimateur plus grande. Toutefois, dans ce cas, la résolution est moins bonne. Un compromis doit donc être adopté entre l'erreur statistique, la rapidité du contrôle et la résolution désirée. Ce compromis est influencé par la concentration en plutonium du barreau.

5.3.2. Erreur due à l'auto-absorption

Etant donné l'énergie relativement faible des rayons gamma émis par le ²³⁹Pu, l'auto-absorption de ceux-ci dans le matériau combustible peut conduire à une erreur si l'homogénéité radiale du plutonium n'est pas parfaite. L'erreur due à l'hétérogénéité radiale du plutonium sera d'autant plus élevée que le diamètre du barreau sera plus grand.

En vue d'évaluer l'influence de l'auto-absorption sur l'exactitude des mesures réalisées, une estimation pratique et théorique du rapport I/I_0 (intensité du rayonnement émis, 384 keV/intensité du rayonnement émergent mesurée à l'aide de l'installation décrite) a été faite dans le cas d'un barreau combustible de 7,5 mm de diamètre intérieur.

Les calculs théoriques ont montré que pour une pastille d'UO₂-15 moles % PuO_2 (90% DT), le rapport I/I₀ était respectivement égal à 0,20, 0,35 et 0,52 lorsque le PuO_2 était soit entièrement localisé au centre de la pastille, soit réparti d'une manière parfaitement homogène, soit entièrement localisé dans une couronne périphérique.

Ces résultats théoriques sont confirmés par les essais pratiques effectués. Ces essais consistaient à mesurer l'activité gamma émise par un fil de plutonium métal (0,8 mm) localisé soit au centre d'une pastille (diamètre 7,5 mm), soit à 0,5 mm de la périphérie de celle-ci. Les résultats montrent que l'activité gamma mesurée dans le premier cas est de l'ordre de 60% inférieure à l'activité mesurée dans le second.



Figure 5

Contrôle de la répartition du plutonium par gammagraphie de barreaux combustibles.

Il ressort de ces considérations que l'interprétation des résultats de ce contrôle nécessite la connaissance exacte de la méthode de fabrication utilisée. Une telle conclusion est illustrée (fig.5) par le contrôle de barreaux constitués par

a) des pastilles frittées homogènes UO₂-PuO₂,

b) des poudres d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium obtenues par coprécipitation - calcination et densifiées par vibration,

c) un mélange physique de trois granulométries de poudres d'UO₂ et de PuO_2 dont seule la fraction fine contient du PuO_2 densifié par vibration.

Lors du contrôle de barreaux constitués par des pastilles frittées, étant donné la bonne homogénéité radiale, les variations du taux de comptage du rayonnement émergent correspondent réellement aux variations de concentration longitudinales en plutonium.

Dans le cas de barreaux densifiés par vibration de poudres d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium, étant donné la répartition homogène du plutonium dans les grains, comme pour les barreaux à pastilles, l'intensité du rayonnement gamma émergent correspond à l'enrichissement en plutonium. La variation longitudinale de la concentration en plutonium doit correspondre à la distribution de la densité, ce qui est d'ailleurs observé dans la pratique.

Lorsque le matériau combustible est constitué par un mélange physique de poudres dont seule la fraction fine contient l'enrichissement en plutonium, la variation longitudinale de l'intensité du rayonnement émergent ne peut, du fait de l'auto-absorption, être identifiée d'une manière absolue à la variation de la concentration en plutonium.

Le résultat obtenu pourra être considéré comme représentatif de la concentration locale en plutonium à condition que la distribution radiale de ce dernier soit telle que le rapport I/I_0 soit égal à 0,35. Ce rapport peut être évalué statistiquement par des essais destructifs autoradiographiques.

DISCUSSION

R. FORSYTH: I would like to comment on the method using the 384-keV gamma radiation for the determination of plutonium in rule elements. The so-called 384-keV gamma is really a complex peak and contains at least eight peaks resolvable by means of spectrometry using a semi-conductor detector. Two of these peaks are due to uranium-237, the daughter of Pu^{241} . The uranium-237 does not quantitatively follow plutonium during precipitation as oxalate and hence grows in with a half-life of 6-7 days. The point I wish to make is that for quantitative determinations or comparisons between different fuel elements, one needs to know both the Pu^{241} content, as mentioned in your paper, and also, in certain circumstances, the time between plutonium precipitation and counting.

P. LIBOTTE: Our equipment is intended to determine variations in enrichment within a rod, and not, at the present stage, to determine the weight of PuO_2 , centimetre by centimetre. We take into account the background noise due to UO_2 by taking measurements on a UO_2 rod geometrically similar to that to be inspected.

The equipment is calibrated with PuO_2 of the same isotopic composition as that in the rods to be checked.

We shall bear your observations in mind when we come to the final stage of our tests, when we shall be making a quantitative determination of the plutonium concentration.

V.V. GORSKY: What type of ultrasonic waves do you use for inspecting thin-walled tubes?

P. LIBOTTE: Given on the one hand the frequency used, and hence the wavelength, and on the other the wall thickness (0.5 mm), we think we obtain a type of wave known as a Lamb wave, but it is very difficult to confirm that this is in fact so.

V.V. GORSKY: What defects do you consider unsafe? What are the permissible depth and length of cracks on the internal surface of the tube?

P. LIBOTTE: We reject tubes containing defects with a depth exceeding 5% of the thickness over a length of 10 mm.

F.H. WELLS: The oscilloscopic presentation of the tube defects by ultrasonic waves would become complicated in the presence of several defects, especially as the echoes are moving. I would suggest that a refinement of electronic instrumentation could select each echo and give a more accurate measurement than the observation of the oscilloscope.

P. LIBOTTE: May I draw your attention to Fig. 1 of my paper. The moving echo passes over the screen, and can easily be observed. At present the operator must pay constant attention to the screen, and for this reason we are now proceeding with automation of the testing procedure.

P. de MEESTER: According to Fig. 5 of your paper, I think absolute variations of 8%, i.e. relative variations of about 25%, have been observed between the gamma measurements and the actual plutonium distribution. Is this the maximum you have encountered? What is the calculated variation

for extreme cases, when it is assumed that all the plutonium is either in the centre or at the periphery?

P. LIBOTTE: Yes, these figures are the highest we have so far observed. If the plutonium is concentrated at the centre of a UO_2 sample 7.5 mm in diameter, the count will be 2.5 times less than if it is distributed around the periphery.

G.H. TENNEY: How do you combat any possible contamination by plutonium when performing the autoradiography?

P. LIBOTTE: We do not in fact combat this. The sample is deposited on the film in such a way that the latter is contaminated by plutonium and cannot be removed from the glove box. We take a photograph of the first picture obtained, and this new film can be handled outside the glove box.

G.H. TENNEY: What does your claim of $\pm 2\%$ accuracy mean? The factors influencing these data are crystal size, temperature influences on the crystal, and the type of scanning, continuous or stop-and-go.

P. LIBOTTE: The figure mentioned refers only to counting error. Since the crystal size is a constant of the equipment and we know the possible variations in temperature of the crystal, we can determine the length of the pause required to obtain the number of counts necessary to allow work with the accuracy mentioned. Counting is effected by the stop-and-go method.

R. SHARPE: I should like to ask a general question as to how much work is being done on the significance of the tube defects that are being traced by these means. It is important that more work be done in this field as, while in this symposium alone there are probably a dozen papers covering a dozen different techniques and a dozen different specifications, there appears to be very little supporting work to provide a scientific basis for setting standards.

P. LIBOTTE: This is a very important question, and one which it is at present impossible to answer. We for our part are trying to find a solution by irradiating fuel-rod samples whose cladding has different types of defects. We also hope to determine, for certain irradiation conditions, the cracks which can be tolerated in tubes.

НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ВИХРЕВЫХ ТОКОВ ДЛЯ МНОГОПАРАМЕТРОВОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ

В.Г. ВЯХОРЕВ, В.Г. ГЕРАСИМОВ, В.П. ДЕНИСКИН, Л.И. ТРАХТЕНБЕРГ И Ю.М. ШКАРЛЕТ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР, МОСКВА

CCCP

Abstract — Résumé — Аннотация — Resumen

SOME POSSIBILITIES OF THE EDDY-CURRENT METHOD FOR MULTI-PARAMETER TESTING OF STRUC-TURAL COMPONENTS. The paper discusses the pattern of occurrence of problems of non-destructive multiparameter testing in nuclear technology and the advisability of approaching these problems by the eddy-current method. The application of electric models is justified for solving testing problems using a long follow-through coil. Design formulae are given and the principles of designing applied eddy-current probes are explained.

An arrangement for testing tube-wall thickness is described: in this apparatus the effect of movement of the tube under testing on the measurement results is eliminated with the aid of a servo-system controlled by a signal depending on the probe voltage phase.

The paper describes how a self-oscillating circuit containing a test-coil is used as the probe of an apparatus for testing tubes.

On the basis of calculated and experimental data various possibilities are indicated for the construction of single-frequency applied eddy-current testing probes for simultaneous measurement of more than two parameters.

QUELQUES POSSIBILITÉS OFFERTES PAR LA MÉTHODE DES COURANTS DE FOUCAULT POUR LE CON-TRÔLE DE NOMBREUX PARAMÈTRES DES ÉLÉMENTS DE CONSTRUCTION. Les auteurs montrent que les problèmes du contrôle non-destructif de plusieurs paramètres en technologie nucléaire surgissent selon certaines lois et que la méthode des courants de Foucault convient particulièrement à la solution de plusieurs d'entre eux. Ils justifient l'utilisation de modèles électriques pour la solution des problèmes de contrôle au moyen d'une longue bobine creuse. Ils donnent des formules et exposent une méthode pour le calcul de détecteurs à courants de Foucault.

Ils décrivent le schéma d'un dispositif permettant de vérifier l'épaisseur des parois de tubes, dans lequel le déplacement du tube à contrôler n'exerce aucune influence sur les résultats des mesures grâce à l'emploi d'un moniteur actionné par un signal qui dépend de la phase de tension du détecteur.

Comme détecteur, on a employé un dispositif destiné au contrôle des tubes d'un autogénérateur, après avoir inclus dans son circuit une bobine d'essai.

En partant des données calculées et expérimentales, les auteurs indiquent diverses possibilités de réalisation de détecteurs à courants de Foucault de fréquence unique permettant le contrôle avec modification simultanée de plusieurs paramètres.

НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ВИХРЕВЫХ ТОКОВ ДЛЯ МНОГОПАРАМЕТРО-ВОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ. Показана закономерность возникновения задач о неразрушающем многопараметровом контроле в ядерной технологии и целесообразность решения некоторых из них методом вихревых токов. Обосновано применение электрических моделей для решения задач контроля с использованием длинной проходной катушки. Приводятся расчетные формулы и излагается методика расчета накладных токовихревых датчиков.

Описана схема прибора для контроля толщины стенки труб, в котором влияние перемещений контролируемой трубы на результаты измерений устраняется путем применения следящей системы, управляемой сигналом, зависящим от фазы напряжения датчика.

Сообщается о применении в качестве датчика прибора для контроля труб автогенератора, с включенной в его контур испытательной катушкой. На основе расчетных и экспериментальных данных показаны некоторые возможности построения одночастотных токовихревых накладных датчиков для контроля при одновременном изменении более чем двух параметров.

ALGUNAS POSIBILIDADES QUE BRINDA EL METODO DE LAS CORRIENTES DE FOUCAULT PARA CON-TROLAR NUMEROSOS PARAMETROS DE LOS ELEMENTOS DE CONSTRUCCION. Los autores demuestran que los problemas del control no destructivo de diversos parámetros se plantean en la tecnología nuclear según ciertas leyes y que el método de las corrientes de Foucault se adapta particularmente a la solución de varios de esos problemas. Los autores justifican la utilización de modelos eléctricos para resolver problemas de control con ayuda de una larga bobina hueca. Presentan fórmulas y exponen un método para el cálculo de detectores a base de corrientes parásitas.

Describen un dispositivo que permite verificar el espesor de las paredes de tubos; en este dispositivo, el desplazamiento del tubo a controlar no ejerce influencia alguna sobre los resultados de las mediciones, gracias al empleo de un monitor accionado por una señal dependiente de la fase de tensión del detector.

En calidad de detector se ha empleado un dispositivo destinado al control de los tubos de un autogenerador después de haber incluido en su circuito una bobina de ensayo,

Partiendo de datos calculados y experimentales, los autores señalan diversas posibilidades de realización de detectores a base de corrientes de Foucault de frecuencia única, que permiten efectuar el control con modificación simultánea de varios parámetros.

Моделирование при исследованиях проходного датчика

Для ядерной технологии характерны тонкостенные трубы, многослойные цилиндры, протяженные изделия сложного профиля, например, цилиндры и трубы, имеющие дистанционирующие ребра, и некоторые другие. Определение изменений параметров проходных датчиков, применяемых для контроля этих изделий, аналитическим путем представляет значительные трудности. Как показал опыт, удовлетворительные решения такого рода задач легко отыскиваются с помощью моделей типа электрических сеток. Известно [2] успешное применение таких моделей при исследовании вопросов дефектоскопии методом вихревых токов.

Основой моделирования магнитных полей методом сеток служит сравнение уравнения для напряженности магнитного поля и уравнения для потенциалов узлов сеток.

Распределение напряженности магнитного поля \dot{H} в бесконечно длинном круговом цилиндре из немагнитного электропроводящего однородного материала, помещенном в равномерное магнитное поле, описывается уравнением Гельмгольца

$$\nabla^2 H - jk^2 H = 0 \tag{1}$$

совместно с условиями

 $k^2 = \omega \mu_0 \sigma;$

$$\dot{H}_{\rho=a}=\dot{H}_{0}$$
 и $\dot{H}_{\rho=0}\neq\infty$,

где

м — круговая частота;

и. — магнитная проницаемость вакуума;

- удельная проводимость материала изделия;
- и координата рассматриваемой точки;
- *H*_{e=a} напряженность магнитного поля на поверхности цилиндра;
 - *H*₀ напряженность внешнего однородного магнитного поля;
- а внешний радиус изделия.

Вводя подстановки

$$\dot{H} = \dot{H}_0 \cdot \dot{H}',$$

$$\rho = a\rho'.$$

занишем уравнение (1) в безразмерном виде

$$\nabla^2 \dot{H}' - j \, k^2 \, a^2 \dot{H}' = 0. \tag{2}$$

При этом, очевидно, $H'_{a-a} = 1$.

Для потенциалов узлов сетки (рис. 1) справедливо уравнение

$$\frac{\varphi_1 - \varphi_0}{R_1} + \frac{\varphi_2 - \varphi_0}{R_2} = j\Omega C \dot{\varphi}_0, \qquad (3)$$

где ϕ_0 , ϕ_1 , ϕ_2 — потенциалы узлов 0, 1, 2; Ω — круговая частота изменения потенциала. Обозначив

$$R_{1} = \Delta x_{1} \cdot R_{0},$$

$$R_{2} = \Delta x_{2} \cdot R_{0},$$

$$C = \Delta x \cdot C_{0}$$



и переходя от уравнения в конечных разностях к дифференциальному уравнению, получим

$$\boldsymbol{\nabla}^{2} \dot{\boldsymbol{\varphi}} - \boldsymbol{j} \boldsymbol{q}^{2} \dot{\boldsymbol{\varphi}} = 0, \qquad (4)$$

где

 $q^2 == \mathbf{\Omega} \mathbf{R}_{\mathbf{\theta}} C_{\mathbf{0}}.$

Вводя подстановки

$$\dot{\varphi} = \dot{\varphi}_0 \cdot \dot{\varphi}',$$
$$x = n_0 x',$$

где φ_0 — потенциал на границе модели;

*n*₀ — раднус модели цилиндра, выраженный числом ячеек сетки;

к — координата модели,

получим

$$\nabla^2 \varphi' - j q^2 n_0^2 \varphi' = 0.$$
 (5)

Из сопоставления уравнений (2) и (5) видно, что они тождественны при выполнении равенства

$$k^2 a^2 = q^2 n_0^2 \tag{6}$$

или

$$\omega p_{\mathbf{a}} \sigma \cdot \boldsymbol{a}^2 = \Omega R_{\mathbf{a}} C_{\mathbf{a}} \boldsymbol{n}_{\mathbf{a}}^2. \tag{7}$$

Выражения (6) и (7) представляют собой критерии подобия при моделировании с помощью сетки сплошного электропроводящего немагнитного цилиндра. Условие на границе сплошного цилиндра $\dot{H'}_{p=a} = 1$ соответствует условию на границе модели $\dot{\varphi'}_{a} = 1$.

При выполнении условий (6) или (7) и условия на границе модели, распределение потенциала φ' в узлах соответствует распределению напряженности магнитного поля по радиусу сплошного цилиндра. Напряжение измерительной катушки проходного датчика соответствует току, проходящему через модель, а напряжение на конденсаторе, включенном последовательно с моделью, соответствует относительной величине напряжения измерительной катушки.

Согласно (7) изменение проводимости материала сплошного цилиндра σ и частоты поля ω можно моделировать изменением частоты тока модели Ω или постоянной времени $\tau = R_0 \cdot C_0$.

Число узлов сетки n_0 выбирается в зависимости от требуемой точности моделирования. Шаг сетки Δn может быть выбран постоянным или меняющимся по определенному закону, если нужно обеспечить более высокую точность в заданной области. Расчет элементов сеток выполняется по известным формулам.

Если радиус контролируемого цилиндра меньше радиуса измерительной катушки, то для области между катушкой и цилиндром $k^2=0$. Следовательно, на модели для этой области необходимо, чтобы $\tau = R_0 \cdot C_0 = 0$. Это условие должно быть выполнено одновременно с выполнением граничного условия $\dot{H}_{\rho=\alpha} = 1$, справедливого при любом радиусе цилиндра a, и следовательно, для указанной области необходимо принять

118

*R*₀=0. Таким образом уменьшение радиуса сплошного цилиндра моделируется на сетке замыканием соответствующих сопротивлений.

При моделировании трубы имеются две области, где $k^2=0$, и следовательно, на модели должно быть два участка с короткозамкнутыми сопротивлениями.

Для моделирования многослойных цилиндрических изделий необходимо применять сетку из сопротивлений и конденсаторов с различными постоянными времени т. Постоянные времени выбираются из соотношения

$$\frac{\tau_1}{\tau_n} = \frac{k_1^2}{k_n^2} = \frac{\sigma_1}{\sigma_n} , \qquad (8)$$

где т₁ = R₀₁ C₀₁ - постоянная времени участка сетки, моделирующего первый слой;

.

 $\tau_n = R_{0n} C_{0n}$ — постоянная времени участка сетки, моделирующего *n*-ый слой.

При исследовании магнитных полей в протяженных изделиях сложного профиля, например, стержнях и трубах, снабженных дистанционирующими ребрами, модели несколько усложняются, однако их применение оправдано отсутствием аналитических решений такого рода задач.

Авторами построены электрические сетки, с помощью которых исследуются практические задачи контроля однородных и многослойных круговых цилиндров.

К теории накладного и экранного датчиков

Отсутствие удовлетворительной теории накладного датчика затрудияло применение его во многих практически важных случаях.

Для нахождения основных соотношений, характеризующих накладной датчик, рассмотрим виток радиуса R_1 , расположенный на высоте h над многослойной средой с параметрами, не зависящими от напряженности поля (рис. 2). Электрическую проводимость p-го слоя обозначаем σ_p , магнитную проницаемость— μ_p , толщину— T_p . По витку проходит синусоидальный ток $I = I \cdot e^{j\omega t}$.

Ввиду осевой симметрии задачи воспользуемся цилиндрической системой координат (*z*, *ρ*, *φ*) с осью *z*, направленной нормально к поверхностям слоев и плоскости витка. Плотность тока в витке зададим формулой

$$i_{\varphi} = I\delta(\rho - R_1) \cdot \delta(z - h), \qquad (9)$$

где

$$\delta(\rho - R_1)$$
 и $\delta(z - h) - \delta$ -функции.

Решая уравнения Максвелла в системе единиц СИ и вводя векторный потенциал \dot{A} , как $\mu \dot{H} = \operatorname{rot} \dot{A}$, получаем уравнение Гельмгольца

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \dot{A}}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial^2 \dot{A}}{\partial z^2} - \left(jk^2 + \frac{1}{\rho^2} \right) \dot{A} = -\mu i_{\varphi}, \qquad (10)$$
$$k^2 = \omega \mu \sigma.$$

где



Рис. 2. Виток над многослойной средой

120

Это уравнение решается операционным методом согласно общей теории интегральных преобразований с выполнением на границах

$$z = 0 = z_1, \quad z = -T_2 = z_2, \dots, \quad z = -\sum_{p=2}^{n-1} T_p = z_{n-1}$$

условий

$$\dot{A}_{p}(\rho, z_{p}) = \dot{A}_{p+1}(\rho, z_{p+1}),$$

$$\frac{1}{\mu_p} \left. \frac{\partial A_p}{\partial z} \right|_{z=z_p} = \frac{1}{\mu_{p+1}} \left. \frac{\partial A_{p+1}}{\partial z} \right|_{z=z_{p+1}}$$
(11)

Кроме того, вектор-потенциал A должен быть ограничен на бесконечности.

В результате решения уравнения (10) получаем выражения вектор-потенциалов для верхнего полупространства

$$\dot{A}_{1}(\rho, z) = \frac{\mu_{0}R_{1}I}{2} \int_{0}^{\infty} e^{-\lambda(z-h)} J_{1}(\lambda R_{1}) J_{1}(\lambda \rho) d\lambda +$$

$$+ \frac{\mu_{0}R_{1}I}{2} \int_{0}^{\infty} \varphi_{1} e^{-\lambda(z+h)} J_{1}(\lambda R_{1}) J_{1}(\lambda \rho) d\lambda$$
(12)

и для нижнего полупространства

$$\dot{A}_{n}(\rho, z) = \frac{\mu_{0}R_{1}I}{2} \int_{0}^{\infty} \frac{\lambda}{q_{n}} f_{n} e^{q_{n}(z + \sum_{p=2}^{n-1} T_{p})} e^{-\lambda h} J_{1}(\lambda R_{1}) \times \\ \times J_{1}(\lambda \rho) d\lambda, \qquad (13)$$

$$q = \sqrt{\lambda^{2} + jk^{2}},$$

где

f_n и φ₁ – функции, зависящие от параметров среды, вид которых определяется граничными условиями;

λ — параметр, по которому проводится интегрирование.

Интегралы (12) и (13) не выражаются точно через известные функции, поэтому не могут быть использованы для получения расчетных формул. Пользуясь приближенным методом [3] нахождения интегралов (12) и (13), можно получить общие выражения для вектор-потенциалов через известные функции. Для каждой конкретной задачи (виток над проводящим полупространством, виток над проводящим слоем и т. п.) из граничных условий определяются функции φ_1 и f_n . После чего нетрудно перейти от выражения для вектор-потенциала к выражению для э.д.с. витка, а затем и катушки.

Таким образом получена приближенная формула для э.д.с., наводимой в катушках, размеры сечений которых малы по сравнению с диаметрами

$$E = -j\omega \, 17 \cdot 10^{-7} \, (\delta - 0, 3) \, w_1 w_2 \, \sqrt{D_1 D_2} \, e^{-3\frac{C}{D}} \, I -$$

$$-j\omega 17 \cdot 10^{-7} (\delta - 0, 3) \, w_1 w_2 \, \sqrt{D_1 D_2} \, e^{-3\frac{H+h}{D}} \, I \cdot \varphi_1(\lambda)_{|\lambda - \frac{3}{D}} \, , \qquad (14)$$

где *h*, *H* – расстояния токовой и измерительной катушек до изделия;

- *w*₁, *w*₂ числа витков токовой и измерительной катушек;
- *D*₁ и *D*₂ диаметры токовой и измерительной катушек;

$$\delta = \frac{D_1}{D_2}$$
, если $\frac{D_1}{D_2} \leqslant 1$ или

$$\delta = \frac{D_2}{D_1}$$
, если $\frac{D_2}{D_1} \leqslant 1$,

причем $0,5 \ll \delta \ll 1$, $\varphi_1(\lambda)|_{\lambda=\frac{3}{D}}$ — функция, вид которой зависит от параметров среды и диаметра *D*, равного большему

из D_1 и D_2 .

Ниже приводятся выражения функции φ₁(λ) для нескольких простейших случаев.

Датчик расположен над неферромагнитным полупространством

$$\varphi_{1}(\lambda)|_{\lambda=\frac{3}{D}} = \varphi_{1}(\gamma_{0}) = j \frac{(3-\sqrt{9+j\gamma_{0}^{2}})^{2}}{\gamma_{0}^{2}},$$
 (15)

где

$$\gamma_0 = D \sqrt{\omega \mu_0 \sigma}$$

Датчик расположен над ферромагнитным полупространством

$$\varphi_{1}(\lambda)|_{\lambda=\frac{3}{D}} = \varphi_{1}(\gamma, \mu_{r}) = \frac{3\mu_{r} - \sqrt{9+j\gamma^{2}}}{3\mu_{r} + \sqrt{9+j\gamma^{2}}}, \quad (16)$$

где $\gamma = D \sqrt{\omega \mu_0 \mu_r \sigma}$.

Датчик расположен над неферромагнитным слоем

$$\varphi_{1}(\lambda)|_{\lambda=\frac{3}{D}} = \varphi_{1}\left(\gamma_{0}, \frac{1}{D}\right) = \frac{\gamma_{0}^{2} \ln \frac{T}{D} \sqrt{9+j\gamma_{0}^{2}}}{6\sqrt{9+j\gamma_{0}^{2}} + (18+j\gamma_{0}^{2}) \ln \frac{T}{D}\sqrt{9+j\gamma_{0}^{2}}}.$$
(17)

На рис. З изображена функция $je^{-3}\overline{D} \varphi_1(\gamma_0)$, характеризующая поведение вектора полной вносимой э.д.с. при изменении обобщенных параметров $\xi = \frac{H+h}{D}$ и γ_0 в случае расположения датчика над проводящим полупространством (14), (15).

На рис. 4 и 5 изображены функции $j\varphi_1(\gamma, \mu_r)$ и $j\varphi_1(\gamma_0, \frac{T}{D})$ в соответствии с формулами (16) и (17).

Математические приемы, аналогичные использованным при получении соотношений, характеризующих накладной датчик, позволяют легко получить основные формулы и для датчика экранного типа.

Для э.д.с. измерительной катушки экранного датчика с внесенным в него листом толщиной *Т*

$$\dot{E}_{s} = -j\omega \, 17 \cdot 10^{-7} \, (\delta - 0,3) \, w_{1}w_{2} \, \sqrt{D_{1}D_{2}} \, e^{-3\frac{T}{D}} \, I \times \\ < \frac{6 \sqrt{9+j\gamma_{0}^{2}} \, e^{3\frac{T}{D}}}{6 \sqrt{9+j\gamma_{0}^{2}} \, ch \frac{T}{D} \sqrt{9+j\gamma_{0}^{2}} + (18+j\gamma_{0}^{2}) \, sh \frac{T}{D} \sqrt{9+j\gamma_{0}^{2}}}.$$
(18)

>

H + h

При отсутствии листа э.д.с. измерительной катушки

$$\boldsymbol{E}_{0} = -\boldsymbol{j}\omega \, 17 \cdot 10^{-7} \, (\delta - 0,3) \boldsymbol{w}_{1} \, \boldsymbol{w}_{2} \, \sqrt{D_{1} D_{2}} \, e^{-3 \frac{H+R}{D}} \, \boldsymbol{l}. \tag{19}$$

Выражение для относительной э.д.с. измерительной катушки

$$\dot{E}_{om_{H}} = \frac{E_{o}}{\dot{E}_{o}} = \frac{6\sqrt{9+j\gamma_{0}^{2}}e^{3\frac{T}{D}}}{6\sqrt{9+j\gamma_{0}^{2}}\cosh\frac{T}{D}\sqrt{9+j\gamma_{0}^{2}} + (18+j\gamma_{0}^{2})\sin\frac{T}{D}\sqrt{9+j\gamma_{0}^{2}}}.$$
 (20)





Рис. 3. Функция $je^{-3\xi} \cdot \varphi_1(\gamma_0)$ в случае немагнитного полупространства

Рис. 4. Функция ј ф(ү, 12) в случае магнитного полупространства

Зависимость *ј* \tilde{E}_{omn} от нараметров $\frac{T}{D}$ и γ_0 показана на рис. 6. Эта зависимость указывает на возможность раздельного измерения толщины и электропроводности листа экранным датчиком.

Приведенные выше формулы для определения э.д.с. накладного и экранного датчиков дают приближение с точностью не хуже 15% в области 20> $\gamma_0>2$.



Получение расчетных формул для накладных и экранных датчиков и построение их годографов позволило внести некоторую ясность в вопрос о возможности их применения для многопараметрового контроля. Одно из частных применений этих соотношений составило содержание последнего раздела настоящего доклада.

Амплитудно-фазовая селекция

Принцип двухпараметрового контроля, основанный на использовании амплитуды и фазы напряжения датчика, питае-



Рис. 6. Относительная вносимая э.д.с. $j\dot{E}_{omh}\left(\tau_{0}, \frac{T}{D}\right)$ измерительной катушки экранного датчика с помещенным в него немагнитным листом

мого синусоидальным током, был исторически первым и получил наибольшее распространение. Однако возможности этого плодотворного принципа, по-видимому, далеко еще не исчерпаны. Проиллюстрируем это положение на примере решения с помощью накладного датчика следующей практической задачи.

Пусть необходимо контролировать толщину стенки груб с диаметром 12 мм, выполненных из немагнитного материала с постоянной электропроводностью $\sigma = 2,5 \cdot 10^6 \frac{1}{o_{M} \cdot M}$. Номинальная толщина стенки трубы T = 0,4 мм. В процессе контроля возможны случайные перемещения труб в радиальном направлении.

Таким образом, эту задачу можно классифицировать как двухпараметровую. Причем один параметр (T) необходимо контролировать, влияние другого (перемещения) — подавлять.

На рис. 7а приведена диаграмма напряжений на датчике при изменении толщины листа (дугообразная кривая) и зазора (веерные линии с узлом в точке \mathcal{A}). При увеличении зазора между датчиком и поверхностью листа при некотором постоянном значении толщины листа вектор напряжения \dot{U} сеоим концом проходит последовательно через точки A, Б, B, Γ и при очень большом зазоре попадает в точку \mathcal{I} . При этом модуль вектора \dot{U} только увеличивается, стремясь в пределе к начальному \dot{U}_{μ^*}

Если из вектора \dot{U} вычесть некоторый вектор $j \dot{U}_{on}$ (рис. 76), то результирующий вектор $\dot{U}_{pes} = \dot{U} - j U_{on}$ при увеличении зазора и прежнем значении толщины листа будет теперь занимать последовательно положения AK, БK, BK, ΓK и $\mathcal{A}K$. При этом величина модуля вектора \dot{U}_{pes} вблизи положения 5K будет принимать минимальное значение.

При другом значении толщины модуль вектора U_{pes} будет принимать минимальные значения в некоторых других положениях *ЕК* и *ЖК* (рис. 7 в), причем величины этих минимумов иные, чем в предыдущем случае.

На рис. 8 изображено типичное семейство зависимостей амплитуды вектора результирующего напряжения \dot{U} и фазы φ этого напряжения от величины зазора h. Аналогичные зависимости получаются и в том случае, когда в качестве опорного выбирается напряжение датчика при некоторых значениях толщипы и зазора (рис. 7 в).

Разработан прибор, в котором подавление влияния перемещений трубы основано на использовании электромагнитного исполнительного устройства, управляющего положением датчика.



Рис. 7 (а, б. в). Векторные диаграммы напряжений накладного датчика

Исполнительное устройство прибора находится в покое, когда фаза результирующего напряжения соответствует минимуму амплитуды (например, для кривых 2 рис. 8 а и 8 б). Отклонения фазы от этого значения преобразуются в изменения управляющего тока исполнительного устройства так, что при увеличении фазы исполнительное устройство уменьшает зазор, а при уменьшении фазы — увеличивает его.

В качестве параметра, несущего информацию о толщине изделия, используется величина амплитуды результирующего напряжения датчика. Поскольку при этом амплитуда близка к минимальной, то возможные небольшие изменения зазора практически не влияют на точность измерения толщины.







Рис. 8 (а, б). Зависимости амплитуды и фазы результирующего напряжения от расстояния между датчиком и изделием для различных контролируемых толщин

Блок-схема прибора для контроля толщины стенки труб приведена на рис. 9.

В этом приборе используется датчик 1 и эталонный датчик 2. Токовые катушки датчиков соединены последовательно согласно и через них проходит синусоидальный ток от ге-



Рис. 9. Блок-схема прибора для контроля толщины стенки трубы

нератора 3. Генератор должен быть, по возможности, ближе по своим свойствам к источнику тока, поскольку в этом случае влияние на точность измерений температурных изменений сопротивления токовой катушки датчика уменьшается.

Измерительные катушки датчика и эталонного датчика соединены встречно. Величина опорного напряжения U_{on} (рис. 7 б) устанавливается потенциометром, когда эталонный датчик находится в воздухе. Если эталонный датчик устанавливается на эталонное изделие, то потенциометр можно исключить.

С измерительных обмоток датчиков 1 и 2 напряжение подается на усилитель 4, после чего усиленное напряжение подается в два канала. В канале индикации оно детектируется амплитудным детектором 5 и регистрируется индикаторным устройством 6. В канале следящей системы напряжение подается на фазовый детектор 7 и усилитель мощности 8, к выходу которого подключен электродинамический механизм 9, связанный механически с датчиком 1. Опорное напряжение с генератора подается на фазовый детектор через фазовращатель 10.

Испытаниями прибора установлено, что перемещения труб на 2 мм вызывают изменения показаний, не превосходящие 1 микрона.

Амплитудно-частотная селекция

Известные трудности разработки фазочувствительных устройств на рабочие частоты, равные мегагерцам и более, ограничивают область применения амплитудно-фазового принципа селекции.

На высоких частотах значительно проще реализуется предложенный авторами [4] амплитудно-частотный принцип. В основу этого принципа положено использование в качестве датчика автогенератора с включенной в его контур испытательной катушкой. Изменения активного и индуктивного сопротивления катушки, связанные с изменениями параметров контролируемого изделия, находящегося в ее поле, изменяют частоту генерируемых колебаний и амплитуду напряжения контура автогенератора, причем амплитуда напряжения и частота, в общем случае, различным образом зависят от параметров контролируемого изделия. Используя различия в этих зависимостях, можно с помощью измерений частоты и амплитуды напряжения в значительной степени ослабить влияние мешающего фактора или осуществлять одновременный контроль двух параметров. Важно заметить, что характер зависимостей выходных величин автогенераторной схемы от параметров контролируемых изделий существенно отличается от соответствующих зависимостей напряжений измерительной катушки двухкатушечного датчика, что открывает новые возможности для селективного многопараметрового контроля изделий.

Амплитудно-частотный принцип использован авторами в разработанном ими приборе для бесконтактного одновременного контроля усредненного паружного диаметра и средней толщины степки тонкостенных труб. Измерение двух параметров в этом приборе производится с помощью проходной катушки на частоте 1 *мгц*.

Замечено, что на величину частоты автогенератора большее влияние оказывает изменение внешнего диаметра, а величина напряжения контура в большей степени зависит от толщины стенки трубы. Эти особенности изменений параметров датчика и положены в основу прибора, состоящего из

двух одинаковых блоков высокочастотных генераторов и блоков измерителей диаметра и толщины стенки труб. Блок высокочастотного генератора содержит автогенератор, частотный дискриминатор и амплитудный детектор. Напряжение с частотного дискриминатора, пропорциональное изменению частоты, поступает на вход блока измерителя диаметра, а напряжение с амплитудного детектора — на вход блока измерителя толщины. Для компенсации влияния изменений диаметра на величину напряжения контура в блок измерителя толшины вводится часть напряжения, снимаемого с частотного дискриминатора, а для компенсации влияния изменения толцины стенки на частоту генерируемых колебаний в блок измерителя диаметра вводится часть напряжения, снимаемого с амплитудного детектора. Прибор может использоваться как с одним из блоков высокочастотного генератора, так и с двумя, в случае измерений по методу сравнения. Прибор предназначен для контроля труб из сталей аустенитного класса лиаметром 6—12 мм и толщиной стенок 0,2—0,4 мм. Испытания прибора показали, что погрешности измерения диаметра и толщины стенок труб не превышают, соответственно, 5 и З микрон.

Селекция при числе изменяющихся параметров, большем двух

В практике ядерной технологии часто встречаются задачи, когда число контролируемых или контролируемых и мешающих параметров больше двух.

В последнее время для решения таких задач успешно применяют приборы, работающие на нескольких частотах. При этом используется то обстоятельство, что э.д.с., наводимые в измерительной катушке датчика на различных частотах, являются линейно-независимыми функциями параметров контролируемого изделия. Применение нескольких рабочих частот для осуществления многопараметрового контроля изделий приводит к значительному усложнению аппаратуры. Поэтому разработка способов контроля на одной фиксированной частоте для условий, когда одновременно изменяется более чем два параметра, представляется заслуживающей внимания. Один из таких способов разработан авторами [5].

Способ основан на применении специального типа многокатушечного накладного датчика, состоящего из одной токовой и нескольких измерительных катушек, диаметры которых различны и превосходят диаметр токовой катушки. При этом э.д.с., наводимые в каждой измерительной катушке, оказываются линейно-независимыми функциями нараметров контролируемого изделия, а векторы вносимых э.д.с. расположены под углом друг к другу, что обусловлено особенностями функции φ_1 , входящей множителем в формулу (14).

Интересен случай, когда две измерительные катушки многокатушечного датчика включены последовательно встречно. Получаемая при этом на выходе датчика разностная вносимая э.д.с. имеет годографы на комплексной плоскости, существенно отличающиеся от годографов обычного накладного датчика. Будем называеть такой датчик векторно-разностным.

Действительно, э.д.с., наводимые вихревыми токами в каждой из измерительных катушек (14), имеющих диаметры D_2 и D_3 , равны соответственно

$$\dot{E}_2 = \dot{E}_{02} \cdot e^{-3\frac{H+h}{D_2}} \varphi_1 \left(\gamma_{02}, \frac{T}{D_2} \right), \qquad (21)$$

$$\dot{E}_{3} = \dot{E}_{03} \cdot e^{-3\frac{H+h}{D_{3}}} \varphi_{1} \left(\gamma_{03}, \frac{T}{D_{3}} \right), \qquad (22)$$

где

$$\begin{split} \dot{E}_{02} &= -j\omega \, 17 \cdot 10^{-7} \left(\frac{D_1}{D_2} - 0.3 \right) w_1 w_2 \, \sqrt{D_1 D_2} \, l, \\ \dot{E}_{03} &= -j\omega \, 17 \cdot 10^{-7} \left(\frac{D_1}{D_4} - 0.3 \right) w_1 w_8 \, \sqrt{D_1 D_3} \, l, \\ \dot{\gamma}_{02} &= D_2 \, \sqrt{\omega \mu_0 \sigma} \, , \\ \dot{\gamma}_{03} &= D_3 \, \sqrt{\omega \mu_0 \sigma} \, , \end{split}$$

причем $D_3 > D_2 > D_1$, где D_1 -диаметр токовой катушки. Обозначив

$$\dot{E}_{02} \cdot e^{-3} \frac{H+h}{D_2} = k_2,$$

$$\dot{E}_{03} \cdot e^{-3} \frac{H+h}{D_3} = k_2,$$

$$\dot{C}_{03} \cdot e^{-3} \frac{H+h}{D_3} = k_3,$$

$$\dot{C}_{03} \cdot e^{-3} \frac{H+h}{D_3} = k_3,$$

$$\dot{C}_{03} \cdot e^{-3} \frac{H+h}{D_3} = k_3,$$

имеем

1

$$E_{2} = k_{2}\varphi_{1}\left(\gamma_{02}, \frac{T}{D_{2}}\right), \qquad (23)$$

$$E_{3} = k_{3}\varphi_{1}\left(\gamma_{03}, \frac{T}{D_{3}}\right). \qquad (24)$$

Откуда разностная э.д.с. на выходе датчика равна

$$\dot{E}_{p} = k_{2}\varphi_{1}\left(\gamma_{02}, \frac{T}{D_{2}}\right) - k_{3}\varphi_{1}\left(\gamma_{03}, \frac{T}{D_{3}}\right).$$
(25)

Обозначая

$$\frac{\dot{E}_p}{k_2} = \varphi_p \left(\tilde{\gamma}_{03}, \frac{T}{D_3} \right),$$

имеем

$$\varphi_p\left(\gamma_{03}, \frac{T}{D_3}\right) = \varphi_1\left(\gamma_{02}, \frac{T}{D_2}\right) - \frac{k_3}{k_2} \varphi_1\left(\gamma_{03}, \frac{T}{D_3}\right).$$
(26)

Рассчитанная по формуле (26) функция $j\varphi_p(\gamma_{08})$ представлена на рис. 10 (а, б, в). Сплошными линиями показана $j\varphi_p(\gamma_{03})$ для случая, когда изменения толщины практически не вызывают изменений функции (большие толщины). Это выполняется при условии $\frac{T}{D_{*}} \gamma_{03} > 2\sqrt{2}$.

Легко видеть, что функция φ_p векторно-разностного датчика, однозначно определяющая зависимость вносимой э.д.с. от контролируемых параметров, имеет на комплексной плоскости совершенно иной характер, нежели аналогичная функция φ_1 двухкатушечного датчика.

Пунктирными линиями показана ј $\varphi_{p}\left(\frac{\gamma_{03}^{2} \cdot T}{D_{3}}\right)$ для случая малых толщин, когда $\frac{T}{D} \rightarrow 0$.

Поскольку $\vec{E}_p = k_2 \varphi_p$, изменение зазора и взаимноє смещение катушек в осевом направлении в первом приб лижении не приводят к получению новых годографов \vec{E}_p Поэтому все построения, которые проводятся для функции φ_p , можно использовать при построении зависимо стей \vec{E}_p от зазора, предварительно найдя по формулам или соответствующим графикам $k_2(h)$, $k_3(h)$, $\frac{k_3}{k_2}(h)$



Рис. 10. Функции $j\varphi_p(\gamma_{03})$ для $\frac{D_3}{D_2} = 2$ и различных значений $\frac{k_3}{k_2}$

Следовательно, для расчета годографов вносимых э.д.с для различных расстояний можно воспользоваться годог рафами, рассчитанными при различных отношениях $\frac{k}{k}$ для функции φ_p .

Определим относительную величину напряжения векто но-разностного датчика, как

$$\dot{U}_{omn} = \frac{U_p}{\dot{U}_{02}} = \frac{E_p}{\dot{E}_{02}}.$$

На рис. 11 показан расчетный годограф относительных вносимых напряжений для векторно-разностного датчика, имеющего $\frac{D_a}{D_a} = 2$, $\frac{U_{0a}}{U_{0a}} = 1$ для случая $\frac{T}{D_a} \ge \frac{2\sqrt{2}}{\gamma_{aa}}$, в



Рис. 11. Относительное вносимое напряжение векторно-разностного датчика при $\frac{k_3}{k_2} = 1$ и $\frac{D_3}{D_2} = 2$

зависимости от параметра γ_{03} (сплошные линии) и отношения $\frac{h}{D_3}$ (пунктирные линии).
Были рассчитаны годографы э.д.с., наводимых полем вихревых токов, при различных значениях $\frac{D_3}{D_2}$ и $\frac{E_{03}}{E_{02}}$, причем оказалось, что наибольшие углы между линиями толщины и электропроводности существенно превосходят аналогичные углы для двухкатушечного датчика. Так, при контроле материалов, для которых $\gamma_{03} = 8$, $\frac{T}{D_4} \approx 0.08$, векторно-разностным датчиком с отношением диаметров $\frac{D_3}{D_2} = 2$ и $\frac{\dot{E}_{03}}{\dot{E}_{02}} = 0.5$, этот угол равен, примерно, 20° , в то время как для двухкатушечного датчика он составляет лишь 5° .

В качестве примера на рис. 12 приводятся экспериментальные годографы векторно-разностного датчика со следую-



Рис. 12. Экспериментальные годографы векторно-разностного датчика

щими данными: $D_1=3$ мм, $D_2=15$ мм, $D_3=20$ мм, аксиальное смещение 2-й катушки относительно 1-ой равно нулю, смещение третьей катушки относительно 1-ой равно 2 мм, количество витков $w_1=w_2=w_3=260$. Сплошными линиями показаны зависимости вносимой э.д.с. от толщины и электропроводности листа, а пунктирными — зависимость этой э.д.с. от величины зазора между датчиком и листом.

Из рис. 12 видно, что в достаточно большой области угол между линией толщины и линией электропроводности близок к 90°. Кроме того, направления изменений э.д.с., вызываемых изменениями электропроводности и зазора, практически совпадают. Следовательно, используя амплитудно-фазовый принцип селекции, можно измерять толщину листа независимо от изменений как электропроводности листа, так и зазора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Forster F., Zeitschrift für Metallkunde, 45, № 4 (1954), p. 188.

2. Сухоруков В. В., Труды МЭИ, LVII. МЭИ, Москва (1964), стр. 157—172.

3. Шкарлет Ю. М., Нерезрушающие методы контроля материалов и изделий, Онтиприбор, Москва (1964), стр. 382—396.

4. Герасимов В. Г., Кулыгин А. И., Шкарлет Ю. М., Неразрушающие методы контроля материалов и изделий, Онтиприбор, Москва (1964), стр. 412—417.

(1964), стр. 412—417. 5. Вяхорев В. Г., Денискин В. П., Трахтенберг Л. И., Шкарлет Ю. М., Электромагнитные методы контроля качества, 2, МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, Москва (1965), стр. 29—44. Session III

•

ПРОБЛЕМЫ ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ РЕАКТОРА ПЕРВОЙ ЧЕХОСЛОВАЦКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

РАДИСЛАВ ФИЛИПП ЗАВОДЫ им.В.И. ЛЕНИНА, ПЛЬЗЕНЬ

Abstract — Résumé — Аннотация — Resumen

THE PROBLEMS OF CONTROLLING DEFECTS IN THE MATERIALS USED FOR THE FIRST CZECHOSLOVAK NUCLEAR-POWER STATION. The paper briefly describes the reactor vessel of the first Czechoslovak nuclearpower station. In order to meet the stringent design and structural requirements involved in fabricating the reactor vessel, which consists of low-alloy, non-aging steel of considerable thickness (650 mm), it was necessary to devise a "control" method for non-destructive testing of the basic material and welded joints.

The ultrasonic pulse method, using one probe, is used extensively in testing the quality of the basic material and welded joints. The paper describes the methods used for carrying out tests and interpreting the results during the investigation of the basic material, and the methods for testing the quality of molten-slag arcless electric welds, carbon-dioxide welds, and manual arc welds.

An automatic flaw-detection apparatus made in Czechoslovakia is used to test flat forgings and rolled products. The apparatus consists of two parts: a travelling mechanism and a UID-A2 ultrasonic flaw-detector made in Czechoslovakia. The apparatus incorporates a number of new features. The effect of distance on the height of the defect signal pulse is compensated and the height remains constant. The effect of irregularity of the acoustic link is also compensated since the data-unit conveys pulses to the remote recording device. An attenuator is used to determine the size of the flaw. An automatic apparatus is now being developed for testing on a vertical cylindrical surface.

Assembly welds on circumferences must be tested at a high temperature. In the V.1. Lenin Plant at Pilsen a special data-unit has been developed for this purpose which makes it possible to carry out tests at elevated temperatures with a high degree of accuracy.

Non-destructive tests of welded structures are also carried out using radiography. The testing of thin longitudinal seam welds and their roots at a high temperature is carried out with an X-ray unit with circular radiation characteristics, using special cassettes. In radiographing thick welds, betatrons of Czechoslovak manufacture are used. The paper describes the methods used for testing and the results obtained and compares the Czechoslovak 15-MeV betatron with the Siemens' betatron.

PROBLÈMES DE CONTRÔLE DES DÉFAUTS DANS LES MATÉRIAUX UTILISÉS A LA PREMIÈRE CENTRALE NUCLÉAIRE DE TCHÉCOSLOVAQUIE. Le mémoire donne une description succincte de la cuve du réacteur de la première centrale nucléaire de Tchécoslovaquie. En raison des spécifications rigoureuses auxquelles doivent répondre les méthodes de construction et d'assemblage de la cuve du réacteur, en acier inoxydable faiblement allié de grande épaisseur (650 mm), il a fallu élaborer une méthode de contrôle non destructif du matériau de base et des soudures, fondés sur l'emploi de « témoins ».

Pour contrôler la qualité du matériau de base et des sourdures, on utilise essentiellement des ultrasons pulsés et une sonde. Le mémoire décrit les méthodes d'essais et l'évaluation des données au cours de l'examen du matériau de base, ainsi que le procédé qui permet de vérifier la qualité des soudures électriques à scorie, des soudures en atmosphère de gaz carbonique et des soudures à l'arc faites à la main.

Le contrôle des plaques forgées et laminées se fait au moyen d'un dispositif automatique de défectoscopie qui a été mis au point en Tchécoslovaquie. Ce dispositif se compose de deux parties: un mécanisme mobile et un détecteur à ultrasons du type UID-A2, de fabrication tchécoslovaque. Il comprend plusieurs éléments inédits. On a compensé l'effet de la distance sur l'ampleur du signal déclenché par un défaut de manière que cette ampleur reste constante. On a compensé aussi l'effet dû aux irrégularités de la liaison acoustique, les impulsions étant communiquées à un dispositif d'enregistrement à distance. L'importance du défaut est évalué à l'aide d'un atténuateur. On met au point un dispositif automatique pour contrôler une surface cylindrique verticale.

Р.ФИЛИПП

Les soudures d'assemblage circulaire doivent être vérifiées à une température élevée. Dans les usines V.I. Lénine de Pilsen, on a élaboré à cet effet un instrument spécial grâce auquel on peut faire des contrôles à haute température avec une grande précision.

Le contrôle non destructif des pièces soudées peut se faire également par radioscopie. La vérification de petites épaisseurs et celle, à haute température, de la base d'une soudure longitudinale sont réalisées à l'aide des rayons X provenant d'un appareil à émanation circulaire, et de cassettes spéciales. Pour la radioscopie des pièces soudées de grande épaisseur, on a recours à un bêtratron de fabrication tchécoslovaque. L'auteur décrit les méthodes d'essai, indique les résultats obtenus et fait une étude comparative entre le bêtatron tchécoslovaque de 15 MeV et celui de Siemens.

ПРОБЛЕМЫ ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ РЕАКТОРА ПЕРВОЙ ЧЕХОСЛОВАЦКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ. Дается краткое описание корпуса реактора первой чехословацкой атомной электростанции. Высокие требования к конструкции и технологии изготовления корпуса реактора, выполненного из низколегированной нестареющей стали (толщина стенок 650 мм), привели к необходимости разработки метода "свидетелей" для контроля прочности конструкции без разрудения основного материала и сварных соединений.

Для контроля качества основного материала и сварных соединений в большой мере используется ультразВуковой импульсный метод с применением одного зенда. Дается описание методики испытаний и оценки показаний во время исследования основного материала, а также методики испытания качества электрошлаковых сварных соединений, сварных соединений, проведенных в атмосфере углекислого газа, и ручных дуговых соединений.

Контроль цельности плоских паковок и проката производится автоматической дефектоскопической установкой, разработанной в ЧССР. Установка состоит из подвижного механизма и ультразвукового дефектоскопа UID-A2, разработанного в ЧССР. Установка отличается рядом новых элементов. Влияние расстояния на высоту всплеска сигнала дефекта компенсировано, и высота остается постояний. Также компенсировано влияние неравномерности акустической связи, причем датчик дает импульсы на дистанционное регистрирующее устройство. Размер дефекта оценивается при помощи атенуатора. В настоящее время разрабатывается автоматическое устройство, позволяющее контролировать вертикальные цилиндрические поверхности.

Монтажные сварные швы по окружности нужно контролировать при повышенной температуре. На заводах им. В.И. Ленина в г.Пльзень для этих целей был разработан специальный датчик, позволяющий осуществлять контроль с большой точностью при повышенной температуре.

Недеструктивный контроль сварных конструкций проводится также просвечиванием. Небольшие толщины и корни продольного сварного шва при повышенной температуре контролируются рентгеном с круговой характеристикой излучения при использовании особых кассет. При просвечивании больших толщин сварных соединений используются бетатроны чехословацкого производства. Дается описание методики испытаний и полученных результатов. Бетатрон чехословацкого производства 15 Мэв сравнивается с бетатроном фирмы Сименс.

PROBLEMAS DE CONTROL DE DEFECTOS EN LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA PRIMERA CENTRAL NUCLEAR DE CHECOSLOVAQUIA. En la memoria se describe brevemente el cuerpo del reactor de la primera central nuclear de Checoslovaquia. Las rigurosas normas seguidas en su construcción (acero inoxidable de baja aleación, de 650 mm de espesor) exigieron elaborar un método de « testigos »para proceder al control no destructivo del material básico y de las soldaduras.

Para el control de calidad del material básico y de las soldaduras se recurrió en gran medida al método de impulsos ultrasónicos, utilizando una sonda. En la memoria se describe la técnica empleada y se evalúan los datos obtenidos; también se expone el método de control de calidad de las piezas soldadas eléctricamente con formación de escorias y de las soldadas en atmósfera de anhídrido carbónico, así como las soldadas a mano mediante arco eléctrico.

La integridad de las placas forjadas o laminadas se controla automáticamente en una instalación de defectoscopia de fabricación checoslovaca, que consta de dos partes: un mecanismo móvil y un defectoscopio de ultrasonidos UID-A2. La instalación se distingue por poseer varios elementos nuevos. La influencia ejercida por la distancia sobre la amplitud de la señal originada por el defecto se compensa de manera que la altura de la señal permanece constante. Igualmente, se compensa el efecto de la irregularidad del acoplamiento acústico; el dispositivo envía impulsos al dispositivo del registro a distancia. Las dimensiones del defecto se determinan

con ayuda de un atenuador. En la actualidad, se está montando una instalación automática que permitirá proceder al control de la superfície de un cilindro vertical.

En el caso de las soldaduras, es necesario efectuar el control en la parte exterior a temperatura elevada. Con esa finalidad, en la fábrica $\ll V.I.$ Lenin \gg de Pilsen se ha construido un dispositivo especial que permite proceçer a controles de gran exactitud a altas temperaturas.

El control no destructivo de los elementos soldados se efectúa igualmente por rayos X. La medición de pequeños; espesores y del metal base de una soldadura se hace mediante rayos X característicos, utilizando chasis especiales. En la radioscopia de piezas soldadas de gran espesor se recurre a un betatrón de procedencia checoslovaca. En la memoria se describe la técnica de los ensayos, los resultados obtenidos y se comparan las características del mencionado betatrón de 15 MeV con otro construido por la firma Siemens.

ВВЕДЕНИЕ

Дефектоскопический контроль очень широко применяется при постройке реактора первой чехословацкой атомной электростанции. Так, при производстве сварных деталей, секций и узлов корпуса реактора на дефектоскопический контроль отводится примерно 44% общего производственного времени.

В процессе производства ответственных деталей реактора дефектоскопический контроль, как правило, повторяется для обеспечения надежности. Дефектоскопический контроль ставится после каждой производственной операции, угрожающей цельности материала. При изготовлении корпуса реактора и его оборудования, тяжеловодного бака, камеры горячего газа и иного внутреннего оборудования, так же как и при производстве внешних трубопроводов, контролируютоя полуфабрикаты в виде поковок, проката, труб и штампованных и гнутых деталей, а также сварные соединения; информативный контроль проводится сразу после сварки и окончательный – после термической обработки, затем после чистовой обработки готовых деталей.

Контролируются строительные материалы нескольких групп, отличающихся технологической требовательностью. Кроме преобладающей группы низколегированных сталей, сюда относятся, прежде всего, группа высоколегированных нержавеющих сталей и специальный легкий сплав алюминия.

Кроме основного материала толщиной до 620 мм, контролируются сварные швы: автоматические электрошлаковые толщиной до 620 мм, полуавтоматические дуговые, сваренные в защитной атмосфере углекислого газа, толщиной до 220 мм и ручные дуговые также толщиной до 220 мм.

Необходимо отметить, что не всегда имеют дело с несложными формами изделий. Контроль производится также в случае геометрически сложных изделий, таких, как цельнометаллические секции с горловинами, и в случае узлов, трудно доступных по своей форме для дефектоскопического контроля, например некоторых типов завершающих сварных швов.

Контролируемые области не всегда хорошо доступны, что не только затрудняет дефектоскопический контроль, но в отдельных случаях исключает использование некоторых методов контроля. Значительная доля всего объема дефектоскопического контроля должна проводиться в условиях монтажа при необычных обстоятельствах, например при повышенной температуре.

Требования, предъявляемые к дефектоскопическому контролю, вызваны необходимостью обеспечить надежность изготовления узлов и безопасность при высоких параметрах работы реактора. Экономия дефектоскопического контроля не должна ни в коем случае сказываться на качестве контроля, хотя много доводов говорит за нее и она желательна и , следовательно, и актуальна.

Дефектоскопический контроль должен гарантировать, что материал не содержит поверхностных и внутренних дефектов в недопустимом масштабе. Руководством здесь служат технические требования, которые для данной цели определяют сорт допустимых дефектов, их максимальный размер и их количество на единицу площади, взаимную конфигурацию и т.д., указывая при этом на методы контроля и некоторые параметры испытаний. Основной материал контролируется во всем объеме ультразвуком по крайней мере в пяти разных направлениях прямыми и призматическими шупами и по всей поверхности некоторым из электромагнитных или люминисцентных методов. Корни сварных швов просвечиваются рентгеном. Сварные швы, также как и основной материал, во всем объеме контролируются ультразвуком и по всей поверхности электромагнитным или люминисцентным методом и вдобавок еще целиком просвечиваются-при толщине до 320 мм-рентгеном, при большей толщине-бетатроном. Сварные швы толщиной более 320 мм, просвечивание которых пока не может быть проведено, контролируются ультразвуком со всех доступных сторон. Корпус реактора, тяжеловодный бак и другие части реактора, включая трубопроводы, нагружаемые давлением, в готовом виде подвергаются испытанию повышенным давлением и также вакуумному испытанию сварных швов на плотность.

Для удовлетворения различных обширных и высоких требований производства и для обеспечения необходимой оперативности Отдел дефектоскопического контроля был снабжен самыми современными аппаратами, и процессы контроля были разработаны до мельчайших подробностей. Конструкционные и технологические особенности некоторых деталей реактора и требования оперативности и экономии дефектоскопического контроля потребовали даже в приведенных условиях решения нескольких задач исследовательского и прикладного характера, целью которых являлось как усовершенствование приборов и методики контроля, так и разработка особых методов работы. Два успешных решения проблем ультразвукового контроля легли в основу данного доклада.

АВТОМАТИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ КРУПНОГАБАРИТ-НЫХ ЗАГОТОВОК

Исключительно большой объем ультразвукового контроля, требование оперативности, ограничение субъективных факторов, экономическое использование труда квалифицированных работников и устранение трудоемкой ручной работы являлись главными стимулами для автоматизирования ультразвукового контроля заготовок, т.е. катаных листов и поковок больших размеров, используемых при строительстве корпуса и крышки и других частей реактора. Каждая заготовка испытывается ультразвуком по всему объему для сортировки по группам по качеству и для заблаговременного снятия неудовлетворяющих изделий из производственного процесса. Площадь контролируемых поверхностей составляет 10-20 м², толщина заготовок достигает 620 мм. Плоские поверхности и возможность установить заготовку в горизонтальное положение являются для автоматизации ультразвукового контроля выгодными, они и предопределили концепцию выбранного передвижного устройства автоматической ультразвуковой установки.

Описываемая автоматическая установка целесообразно перемещает щуп по контролируемой поверхности, причем регистрирует все дефекты предписанного минимального размера и большие, находящиеся в целом объеме контролируемой заготовки. Установка состоит из электронной и механической частей. Электронную часть представляет ультразвуковой дефектоскоп марки УИД-А 2, разработанный Государственным исследовательским институтом теплотехники в Праге. Механическая часть состоит из подвижного и регистрирующего устройства, разработанного и изготовленного на заводе им.В.И. Ленина в г. Пльзень.

При разработке и конструировании автоматической установки был в максимальной мере использован опыт по ультразвуковому контролю заготовок соответствующего сортимента, проводимому обычным способом. Размеры дефектов оцениваются с помощью метода, использующего высоту эхо-сигнала на экране ультразвукового дефектоскопа. Известно, что высота эхо-сигнала от малого дефекта, форма и материал которого дают идеальные условия для отражения ультразвуковых волн, пропорциональна напряжению, появляющемуся на ультразвуковом щупе, согласно закономерности данной уравнением:

$$U_v = U_G K A_m \pi^2 \frac{D_v^2}{D^2} \frac{\ell_0^2}{\ell^2} e^{-2\alpha \ell},$$

где U_G — пиковое напряжение импульса, поступающего на электроакустический преобразователь;

- К -коэффициент электроакустической трансформации, включающей коэффициент прохождения ультразвуковых волн из щупа в материал и обратно;
- D диаметр преобразователя;

D_v -диаметр дефекта;

А (A_m) - коэффициент усиления (максимальный);

l . - глубина дефекта;

ℓ₀ – длина близкого поля;

α -коэффициент затухания.

Основным требованием является регистрация всех дефектов, размеры которых превышают заданную границу, независимо от места расположения последних в контролируемом материале. Чтобы достичь этого и чтобы можно было использовать высоту эхо-сигнала для управления записывающим устройством, необходимо, чтобы высота всплеска зависела только от размера дефекта и остальные величины были или постоянные, или же компенсированы. Так как приведенная зависимость (1) верна только для идеального дефекта, на котором имеются оптимальные условия отражения, то из дальнейших рассуждений исключается влияние материала, формы и типа дефекта. Эти идеальные дефекты обычно имитируются цилиндрическими отверстиями с плоским дном, которое представляет собой отражающую поверхность. Диаметр сверления затем является сравниваемой вели-

(1)

чиной для размера естественного дефекта. В таком случае мы говорим о эквивалентном диаметре естественного дефекта. Переменными величинами остаются тогда влияние акустической связи и влияние расстояния дефекта от щупа и затухание в материале.

Компенсация производится электрическим способом в цепях усилителя и генератора импульсов ультразвукового дефектоскопа двумя способами.

При компенсации акустической связи мощность генератора в промежутке между двумя импульсами регулируется таким образом, что мощность первого эхо-импульса (например,донного) сравнивается с эталонным импульсом, их разница фиксируется в памяти и служит для управления генератором при следующем импульсе. При действии компенсации акустической связи на экране, таким образом, возникают удвоенные эхо-сигналы, причем высота компенсированного выплеска остается такой же, как и при хорошем акустическом контакте.

Компенсация влияния расстояния (глубины дефекта) производится посредством изменения усиления усилителя во времени по одинаковому закону, по которому падает высота всплеска от дефекта.

Результатом приведенных двух компенсаций является постоянная высота эхо-сигналов от дефектов определенного размера в некоторых пределах расстояния дефекта от поверхности щупа. Напряжение в таком случае определяется выражением:

$$U_{v} = U_{G}KA_{m}\pi^{2} \frac{D_{v}^{2}}{D} \frac{\ell_{0}^{2}}{\ell_{m}^{2}} e^{-2\alpha\ell_{m}}, \qquad (2)$$

где l_m - максимальная глубина компенсации.

Компенсированные эхо-сигналы сортируются монитором, и всплески, превышающие заданный уровень, приводят в действие записывающее устройство. Записывающее устройство является частью механического устройства и регистрирует проекцию дефекта на контролируемую поверхность.

Механическая часть автоматического устройства схематически изображена на рис.1. Щуп находится в стандартном держателе (1), который обеспечивает постоянное расстояние щупа от поверхности испытываемой заготовки. Держатель свободно прикреплен к тележке (2), и последняя перемещается одной стороной по направляющей и другой-по поверхности заготовки от одного шагающего устройства к другому (4). Шагающие устройства размещены прикраях заготовки и шагают в направлении перпендикулярном к направлению движения тележки. Шагающие устройства перемещаются только тогда, когда тележка находится над одним из них. Тележка, таким образом, перемещается на следующий путь. Результирующее движение щупа, таким образом, происходит по прямым, перпендикулярным к перемещению шагающих устройств. Расстояние между соседними путями такое, что высота эхо-сигнала от дефекта, находящегося в середине между двумя соседними путями, падает максимально на 2 дб. На тележке прикреплен регистрирующий цилиндр (5), который поворачивается синхронно с перемещением тележки. Дефекты отмечаются записывающим приспособлением (6), которое перемещается скачкообразно в соответ-

144



Рис.1

Схема автоматического ультразвукового устройства ЗАУЗ-1:

1-держатель; 2-тележка; 3-направляющая; 4-шагающее устройство; 5-регистрационный цилиндр; 6-записывающее устройство; 7-блок управления и питания; 8-ультразвуковой дефектоскоп УИД-А2; 9-щуп.

ствующем направлении, синхронно с перемещением шагаюцих устройств. Движения тележки, шагающих устройств и записывающего приспособления управляются автоматически блоком управления (7).

Дефекты заданного и большего эквивалентного диаметра заносятся в двухразмерный чертеж, который является проекцией дефектов до плоскости контролируемой поверхности заготовки. Чертеж выполнен в определенном масштабе, так что без дальнейшей обработки может быть приложен к протоколу об испытании. Для регистрации дефектов по глубине нужно установку дополнить аппаратом с разверткой типа Б и сфотографировать расположение дефектов на отдельных путях тележки.

При использованной концепции точность измерения можно регулировать, и может быть получена точность, принципиально достижимая с помощью данного ультразквукового метода. При выбранных параметрах, которые оправдали себя при ручном контроле, т.е. при частоте 2 Мгц и продольном колебании, можно регистрировать дефекты эквивалентного диаметра 2 мм до глубины 300 мм и 3 мм до глубины 500 мм. С этой точки зрения автоматический контроль не уступает ручному. По сравнению с ручным автоматический контроль имеет следующие преимущества.

Совсем исключается влияние субъективных факторов, в результате чего можно контроль считать надежным на 100%.

Благодаря компенсации влияния расстояния снижается вероятность регистрации ложных эхо-сигналов вблизи контролируемой поверхности.

Испытания можно проводить на поверхности с обработкой по ЧСН до Ra 25 микрон, т.е. на гораздо более шероховатой поверхности, чем при ручном способе.

10

Акустический контакт создается с помощью технической воды. На опытной автоматической установке ЗАУЗ 1 были получены следующие параметры:

Размеры, степень обработки, чувствительность

ультразвуковой дефектоской уид А2	25	кг		
Тележка с регистрирующим устройством и				
держателем щупа	29	кг		
Два шагающих устройства	23	кг и	46	кг
Направляющая	13	кг		
Блок управления и питания около	25	кг		
•				

Общий вес около 138 кг.

При обычном ультразвуковом контроле с помощью универсального ультразвукового дефектоскопа щупом, перемещаемым вручную, производительность двух операторов, составляющих рабочую бригаду, достигает примерно 1 м² в час, при небольшом количестве дефектов в заготовке. Автоматическую ультразвуковую обстановку обслуживает один оператор, и его производительность в 6 раз больше, независимо от количества дефектов в заготовке. Полученный чертеж можно использовать как часть протокола по проведенному ультразвуковому испытанию.

Автоматическое ультразвуковое устройство после начальной настройки и приведения в действие работает самостоятельно, и действия оператора ограничиваются наблюдением. Если необходимо дефекты рассортировать по группам (две или более), необходимо использовать два или более ультразвуковых аппарата, при чем их щупы можно расположить на одной тележке. Более широкое применение в промышленности могут иметь и отдельные части описываемого устройства. Например, один специальный ультразвуковой дефектоскоп может быть выгодно использован для быстрой и точной оценки дефектов при ручном контроле толстостенных заготовок и изделий в случае небольшой или геометрически сложной контрольной поверхности, где применение автоматического контроля нецелесообразно.

После некоторой переделки передвигающего устройства можно применить автоматическую ультразвуковую установку также для контроля с вертикальных контролируемых поверхностей, плоских или цилиндрических.

10*

проблемы дефектоскопического контроля

ультразвуковои контроль наклонными щупами при температуре испытуемого материала 60-70° с

В процессе производства корпуса реактора по технологическим причинам появилась необходимость применять ультразвуковой контроль многослойных сварных соединений толщиной 150-220 мм при температуре последних 60-70°С.

Ультразвуковой контроль сварных соединений корпуса реактора производится призматическими щупами, в которых для перехода колебаний из преобразователя в материал используется органическое стекло. Определение эквивалентного диаметра дефектов производится с точностью ±2 дб. Очевидно, что изменения чувствительности щупа, вызванные изменением температуры клина из органического стекла, не должны превышать приведенную величину. При повышении температуры оргстекла от 20° до 60°С происходит целый ряд изменений, из которых в случае призматического щупа необходимо учитывать прежде всего повышение затухания ультразвуковых колебаний. Изменением скорости распространения ультразвуковых колебаний в приведенном интервале температур можно пренебречь, а последствий изменений размеров вследствие различной температурной растяжимости можно избежать, применив соответствующую конструкцию щупа.

Измерениями с щупом на частоте 2 Мгц в оргстекле было найдено при повышении температуры от 20° до 60°С повышение затухания 0,47 дб на 1 мм пути, что при среднем пути ультразвуковых волн в призме около 18 мм приводит к понижению чувствительности щупа на 8-9 дб. Действительно, при калибровке призматических щупов при температуре эталона с искусственными дефектами и щупов 20° и 60°С было найдено падение чувствительности щупов на 9-10 дб. Это очень хорошо согласуется с вышеприведенными результатами и доказывает, что в изменении чувствительности щупа другие факторы практически не участвуют.

Понижение чувствительности щупа, связанное с увеличением температуры, можно легко компенсировать повышением чувствительности или мощности ультразвукового электроскопа. Проблема заключается в поддерживании температуры щупа, зависимой от температуры контролируемого материала и окружающей среды, настолько постоянной, чтобы ее изменения не вызывали изменения чувствительности, превышающие приведенные ±2 дб. Способов стабилизации температуры щупа было опробовано несколько, из которых самым выгодным оказался способ стабилизации температуры с помощью протекающей воды, нагретой до 60°С.

Щуп с температурной стабилизацией схематически изображен на рис.2. Дисковый преобразователь (1) прикреплен к призме из оргстекла (2). Термистор (3) для измерения температуры внутри щупа помещен в отверстии, высверленном в демпфере (4) и частично в призме из оргстекла. Отверстие размещено на одинаковом расстоянии от контактной поверхности, как центр преобразователя и ближе к боковой поверхности щупа, чтобы оно не попадало в область, в которой распространяются ультразвуковые колебания. Все тело щупа помещено в защитный металлический корпус (5), окруженный одним витком медной трубки (6). Весь щуп покрыт слоем полимеризированной пластмассы (7), служащей теплозащитой. Температура воды, протекающей в медной трубке, поддерживается на уровне 60°С водяным термостатом. Это самая низкая температура, при которой можно





Призматический щуп с температурной стабилизацией:

 1-пьезоэлектрический преобразователь; 2-призма из оргстекла; 3-термистор; 4-демпфер;
5-защитный металлический корпус; 6-медная трубка: 7-теплоизоляция.



Рис.3

Тело температурной модели щупа:

1-термопары TČ1 и TČ2; 2-термистор Т; 3-платиновые термосопротивления PM1 и PM2.

поддерживать изменения чувствительности щупа в допустимых пределах.

Из конструкции щупа ясно, что даже при стабилизации температуры протекающей водой температура призмы из оргстекла изменится в зависимости от того, будет ли она приложена к нагретому предмету, или будет находиться на воздухе. Для исследования распределения температуры внутри щупа была составлена так называемая температурная модель щупа. От щупа, приведенного на рис.2, она отличается тем, что преобразователь заменен двумя термопарами (TC 1, TC 2, в середине и у края призмы), а с обеих сторон термистора (T) встроены платиновые термосопротивления (PM1, PM2). Тело щупа с встроенными датчиками изображено на рис.3. Пять датчиков, встроенных в тело щупа, позволяют следить за изменениями и распределением температуры при разных внешних условиях имитирующих производственные условия при ультразвуковом контроле. Результаты измерений изображены графически на рис.4.

До момента времени "0" в температурно-стабилизованной модели, находящейся в воздухе, установилась равновесная температура. В момент времени "0" модель была приложена к эталону, нагретому до 65°С и после некоторого времени снята на 10 мин. Из графика видно, что если



Температура модели щупа при различных условиях:

а-модель находится в воздухе; b-модель приложена к эталону, нагретому до 65°С; с-модель находится в воздухе; d-модель снова приложена к эталону.

температура контактной поверхности существенно изменяется (РМ1), то температура внутри щупа остается постоянной (PM2, TC1, TC2) и равной температуре, замеренной термистором. При производственном контроле температура термистора оставалась также постоянной и равной температуре, замерянной на модели, независимо от температуры контролируемой поверхности, которая изменялась в пределах от 60° до 70°С. Температура призмы из оргстекла, которая интересует нас с точки зрения затухания ультразвуковых колебаний, будет тогда находиться между температурой поверхности испытуемого объекта и 60°С. Принимая распределение температуры линейным, можно с помощью приближенного расчета определить изменения чувствительности при приложении щупа к поверхности с разной температурой. Такой расчет показывает, что для температуры поверхности от 60° до 70°С изменения чувствительности не превышают допустимые пределы. Исходной чувствительностью при этом считается чувствительность при настройке аппаратуры по эталону с искусственными дефектами, нагретому до 65°C.

Описанный призматический щуп позволяет провести ультразвуковой контроль сварных соединений при их температуре от 60° до 70°C с такой же чувствительностью и надежностью, как при лабораторной температуре.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] "Сборник докладов по неразрушающим методам контроля материалов", Дом техники, Братислава, 1964.
- [2] ОБРАЗ Я., "Устройство для автоматического поддерживания чувствительности ультразвукового импульсного дефектоскопа", чехосл. патент № 100120.
- [3] СВОБОДА Я., АНДРЛИК В., ГАВЕЛ Я. "Способ и устройство для автоматического перемещения щупа ультразвукового дефектоскопа и регистрации дефектов", заявка на чехосл. патент РВ 3200-64.

DISCUSSION

J. DORY: What is the rate of surface inspection with the automatic equipment you have described?

Р.ФИЛИПП

R. FILIP: Six square metres per hour.

J. DORY: What type of recorder is employed?

R. FILIP: An electronic recorder

J. DORY: What is the scanning speed of the acoustic probe?

R. FILIP: Ten metres per second.

J. DORY: What is the surface resolution?

R. FILIP: Two millimetres for a thickness of 300 mm and 3 mm for a thickness of 500 mm.

G. VERSTAPPEN: What kind of transducers are used in your ultrasonic detection and what are the backing materials?

R. FILIP: Quartz with a layer of barium titanate.

NON-DESTRUCTIVE TESTING IN REACTOR PRESSURE-VESSEL FABRICATION

W. J. McGONNAGLE FLUIDS DYNAMICS RESEARCH, IIT RESEARCH INSTITUTE, CHICAGO, Ill., UNITED STATES OF AMERICA

(Presented by D. W. BALLARD)

Abstract — Résumé — Аннотация — Resumen

NON-DESTRUCTIVE TESTING IN REACTOR PRESSURE-VESSEL FABRICATION. The objective of this paper is to outline briefly a quality control programme for the design and fabrication of a reactor pressure-vessel which will meet all nuclear and safety requirements, and to show the place and importance of non-destructive testing in achieving that objective.

Failure in materials, components, and assembly has demonstrated that our present techniques of fabrication are not sufficient alone to assure constant reliability in critical components. Flaws and inhomogeneities occur even when using the best processes and properly controlled methods and techniques. Thus an adequate and well-integrated non-destructive testing programme is necessary to assure the quality level required in a nuclearreactor pressure-vessel. The principal non-destructive methods used by fabricators of reactor pressure-vessels are: visual, X-ray and gamma radiography, ultrasonics, magnetic particle, and liquid penetrant. The non-destructive testing programme includes the inspection of plate material, forging, casting, cladding and welds. The particular non-destructive testing problems met in nuclear pressure-vessels are discussed. The specialized techniques peculiar to the non-destructive testing of pressure vessels and their components are illustrated and discussed.

The applicable codes and specifications, such as the Boiler and Pressure Vessel Code of the American Society for Mechanical Engineers and other regulatory bodies, are outlined. How non-destructive testing can help to comply with the specifications and requirements of various regulatory bodies, and the adequacy and applicability of standards used in such an application are discussed. Realistic but adequate acceptance and rejection criteria are suggested.

A procedure is outlined which will help non-destructive personnel to perform adequately their functions at the proper time in the fabrication cycle. The inter-relationships of the non-destructive testing group with the other groups involved in the fabrication of the pressure vessel are discussed.

ESSAIS NON DESTRUCTIFS DANS LA FABRICATION DES CAISSONS ÉTANCHES DE RÉACTEURS. Le mémoire a pour objet d'exposer les grandes lignes d'un programme de contrôle de la qualité dans la fabrication d'un caisson étanche de réacteur qui satisfera à toutes les spécifications du point de vue nucléaire et de la sécurité, et de mettre en évidence le rôle et l'importance des essais non destructifs dans ce programme.

Les défauts constatés dans les matériaux, les éléments et leur assemblage montrent que les méthodes actuelles de fabrication ne permettent pas en elles-mêmes d'assurer le maintien de la qualité des éléments critiques. Il se produit des pailles et des hétérogénéités mêmes lorsque l'on utilise les meilleurs procédés de fabrication et que l'on applique des méthodes et techniques dûment contrôlées. C'est pourquoi, afin d'obtenir la qualité requise pour un caisson de réacteur, il faut exécuter un programme approprié et cohérent d'essais non destructifs. Les principales méthodes d'essais non destructifs appliquées par les fabricants de caissons de réacteurs sont les suivantes: inspection visuelle, radiographie par les rayons X ou gamma, ultrasons, particules magnétiques et pénétration de liquides. Le programme d'essais non destructifs comporte le contrôle des matériaux, du forgeage, du moulage, du gainage et des soudures. L'auteur étudie les problèmes particuliers que posent les essais non destructifs des caissons ét anches. Il décrit et discute les techniques spéciales propres aux essais non destructifs des caissons et de leurs éléments.

Le mémoire donne un aper cu des règlements et spécifications applicables, notamment du règlement de fabrication des bouilleurs et caissons étanches publié par la Société américaine des ingénieurs mécaniciens. L'auteur étudie la mesure dans laquelle les essais non destructifs peuvent contribuer à répondre aux spécifications imposées par les institutions de normalisation, ainsi que la mesure dans laquelle les normes admises pour ces

essais sont appropriées et applicables. Il suggère des critères, à la fois réalistes et satisfaisants, d'acceptation et de rejet.

Il expose les grandes lignes d'une procédure qui permettra au personnel chargé des essais non destructifs d'accomplir sa tâche de manière appropriée au stade opportun du cycle de fabrication. Il étudie les rapports entre le groupe chargé des essais non destructifs et les autres groupes de personnel intervenant dans la fabrication du caisson.

НЕДЕСТРУКТИВНОЕ ИСПЫТАНИЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ РЕАКТОРНЫХ БАКОВ ВЫ-СОКОГО ДАВЛЕНИЯ. Цель работы заключается в том, чтобы дать краткое описание программы контроля качества конструкции и изготовления реакторного бака высокого давления, который удовлетворяет всем требованиям с точки зрения ядерного процесса и безопасности эксплуатации, а также показать значение недеструктивного испытания в достижении этой цели.

Дефекты материалов, компонентов и сборки показали, что наши нынешние методы изготовления являются недостаточными для обеспечения многократной надежности критических компонентов. Трещины и неоднородность в структуре материала бывают даже тогда, когда используются наилучшие процессы и должным образом контролируемые методы и процедуры. Необходима более совершенная комплексная программа недеструктивных испытаний для того, чтобы обеспечить такой уровень качества, который требуется для реакторного бака высокого давления. Изготовители таких баков используют следующие методы недеструктивных испытаний: визуальный, рентгеновский и гамма-радиографию, ультразвук, магнитные частицы и проникновение жидкости. Программа недеструктивных испытаний включает проверку материала пластины, штамповки, отливки, оболочки и сварных швов. Обсуждаются определенные проблемы, с которыми сталкиваются при изготовлении ядерных баков высокого давления. Приводятся примеры и обсуждаются специфические методы недеструктивных испытаний баков высокого давления и их компонентов.

Излагаются действующие правила и спецификации, например инструкция по эксплуатации котлов и других сосудов высокого давления, изданная Американским обществом инженеров-механиков, а также инструкции других распорядительных органов. Обсуждаются вопросы, каким образом испытание без разрушения может содействовать соблюдению спецификаций и требований, предусмотренных различными распорядительными органами, а также вопросы достаточности и пригодности стандартов, которые используются при таком применении. Предлагаются реалистичные и вместе с тем отвечающие требованиям критерии для приемки и браковки.

Дается описание процедуры, которая окажет помощь персоналу, занимающемуся недеструктивными испытаниями, должным образом выполнять свои обязанности в соответствующее время в процессе изготовления. Рассматривается взаимосвязь между группой, проводящей недеструктивные испытания, и другими группами, связанными с изготовлением сосудов высокого давления.

ENSAYO NO DESTRUCTIVO DURANTE LA FABRICACION DE RECIPIENTES DE PRESION PARA REACTORES. El presente trabajo tiene como finalidad esbozar brevemente un programa de control de calidad aplicado en el proyecto y construcción de un recipiente de presión para reactor, capaz de satisfacer todas las exigencias nucleares y de seguridad; asimismo se propone poner de manifiesto el papel y la importancia de los ensayos no destructivos en el logro de ese objetivo.

Las fallas observadas en materiales, componentes y conjuntos de elementos, ponen de manifiesto que las actuales técnicas de fabricación no bastan por sí solas para garantizar en todos los casos la seguridad de servicio de los componentes críticos. Aun empleando los mejores procesos, así como también métodos y técnicas sometidas a controles apropiados, aparecen fallas y heterogeneidades. Por lo tanto, se requiere un programa adecuado y correctamente integrado de ensayos no destructivos, a fin de lograr el nivel de calidad imprescindible para el recipiente de presión de todo reactor nuclear. Los principales métodos no destructivos aplicados por los fabricantes de recipientes de presión para reactores son: inspección visual, radiografía y gammagrafía, ensayo ultrasónico, y empleo de partículas magnéticas y de líquidos penetrantes. El programa de ensayos no destructivos incluye la inspección del material en forma de chapas, piezas forjadas, piezas coladas, revestimientos y soldaduras. Se analizan en este trabajo los problemas particulares con que tropieza el ensayo no destructivo aplicado a recipientes de presión para reactores nucleares. Se exponen y discuten las técnicas especializadas propias del ensayo no destructivo de recipientes de presión para reactores nucleares.

Se da una idea general de las normas y especificaciones pertinentes, tales como el Código de Calderas y Recipientes de Presión, de la American Society for Mechanical Engineers, y de otras organizaciones de supervisión. Se analiza la manera en que el ensayo no destructivo puede contribuir a satisfacer las especificaciones y requerimientos de esas diversas organizaciones, y también la conveniencia y posibilidad de aplicar las normas usadas en tales casos. Se sugieren criterios realistas, pero apropiados, de aceptación y rechazo.

Se esboza un procedimiento que permitirá y ayudará al personal dedicado a estos ensayos, a cumplir adecuadamente sus funciones en el momento apropiado del ciclo de fabricación. Se discute la relación existente entre el grupo de ensayos no destructivos y los demás grupos que intervienen en la fabricación de los recipientes de presión.

INTRODUCTION

This paper deals with the meaning of quality control as used in the United States of America for the manufacture of nuclear-reactor pressurevessels. An organization with proper managerial direction and adequate technical support can provide the required quality control for the manufacture of nuclear-reactor pressure-vessels.

The goal to have every component or manufactured unit absolutely perfect is logical but unrealistic. Flaws and inhomogeneities occur even when using special heats of base material, the best processes, and properly controlled manufacturing methods and techniques. Non-destructive tests are capable of revealing material discontinuities which will cause failure as well as those that do not. One problem is to establish a realistic basis for accepting and rejecting material and components as well as the completed pressure vessel. Consequently, quality may be defined as the level of performance required to ensure safety of the vessel. The safety of a reactor depends on more than compliance with codes or rules in its design and construction. Safety also depends on how the reactor is to be operated. Quality control is the technique used to ensure safety.

Reactor pressure-vessel design and manufacture require the integration of many areas of technical knowledge. The technology for design, construction and operation of nuclear-reactor pressure-vessels is still developing. The design and manufacture of a pressure vessel incorporates experiences gained

in the familiar branches of engineering and, in addition, utilizes new information and a developing technology. Consequently, the experience available in other industries is often missing and many of the decisions must be ultraconservative to avoid any possibility of a serious nuclear incident. Thus, reactor design criteria are compromises determined by safety, nuclear, chemical, metallurgical, mechanical, radiological, and biological considerations. However, the safety of the entire system must always be the primary responsibility of the designer and manufacturer.

The primary objective is to build a quality product and deliver it to a satisfied customer. Since quality does not depend upon inspection, the quality control programme must start at the design stage. Quality must be designed and built into the product and must be an integral part of the design, material, workmanship, and of the non-destructive testing. A reactor-pressure vessel is a major undertaking and involves the user, purchaser, project engineer, designer, draftsman, material engineer, welding engineer, non-destructive testing engineer, inspector and, because of licensing requirements, the local, state, and federal governments. The different viewpoints and requirements of all these authorities must be coordinated to ensure that the essential functions of the product are provided without compromising quality or reliability.

If a reliable pressure vessel is to be built, a well-developed plan for attaining the desired qualities must be developed and followed. All persons involved must be convinced that quality control is of paramount importance to the success of the undertaking. Building a nuclear-reactor pressurevessel is a team effort and only with each team member operating efficiently can the desired product be made. Unfortunately, team members are often far apart, so it is essential to establish adequate communications and areas of responsibility. All significant communications must be written.

An adequate and well-integrated non-destructive testing programme is necessary to ensure the quality level required in a nuclear-reactor pressurevessel. The principal non-destructive testing methods used or required by pressure-vessel manufacturers are visual, magnetic-particle, liquid-penetrant, radiography, and ultrasonic.

It is not sufficient to acquire the necessary instruments for nondestructive testing; the tests must be properly applied and intelligently interpreted by an adequate number of properly trained personnel. In developing non-destructive testing techniques for specific applications, destructive tests must be made to verify the test results. During the testing programme some kind of "reference standard" must be used to determine that the tests are being properly applied, that the instrumentation is operating satisfactorily at the desired level of sensitivity, and that the required resolution is being achieved.

Sufficient funds and time must be allocated to carry out all phases of the quality control programme. With proper managerial direction, adequate technical training, and informed workmen, an organization can design and make a pressure vessel which will meet all the design, nuclear, and safety requirements.

The design and manufacture of a pressure vessel depends on the production team who must have a pride in workmanship that will ensure quality. True reliability depends upon the individual recognizing signs of trouble and deviations from standards. In general experience shows that people do not make mistakes during repetitive tasks. Mistakes are caused by inadequate communication, lack of knowledge, or carelessness. Lack of knowledge can be overcome by training; communications depend upon proper planning; and attention to work is achieved though pride in workmanship and adequate supervision. Therefore, it must be a part of the over-all programme to train personnel and to stress the importance of their particular task.

PHASES OF EFFORT

The production of a nuclear-reactor pressure-vessel can be divided into four phases: the information, creative planning, and constructive phases. The quality control personnel must be involved in each of these.

During the information phase of the programme all pertinent facts concerning the function of the vessel, operating conditions, and any specific requirements must be obtained. Special attention must be paid to the safety requirements. Before the final technical report is submitted, a complete



Organization plan of hypothetical company

technical review should be made by the entire team to be sure that all requirements are met and that the interrelationships and interactions between the system and all the subsystems will be compatible.

In the creative phase the basic ideas must be formalized, the detailed design must be developed by the various specialists, and the over-all system configuration developed. Special requirements of the vessel must be studied, detailed, and incorporated in the design. Detailed interactions of various components and system parts must be considered. Consideration must be given to the various regulatory codes under which the vessel is to be made and operated. It is at this stage that the lines of communication must be established between the customer, the various groups working on the vessel, and the inspection agencies.

In the planning phase the materials, processes, and procedures must be evaluated to determine if they will be satisfactory. During planning suppliers must be consulted concerning the production of materials, components, and assemblies. Special processes that may be required must be investigated. At this point the inspection processes are established and made part of the over-all plan.

The construction phase is probably the most critical time from the standpoint of quality. Under ideal conditions, if all the other phases have been properly executed, construction should present no problems. Experience has shown, however, that even with the best advance planning, problems do arise. Careful attention to planning details minimizes or even eliminates problems and production delays.

The organization plan of a hypothetical manufacturing company is shown in Fig. 1. The quality control manager is on the same administrative level as the other managers so that his position cannot be compromised, and decisions affecting quality can be reversed only by higher authority. He supervises the carrying out of the non-destructive testing work.

A hypothetical quality control department is shown in Fig.2. The nondestructive testing engineer's function is to develop procedures, train personnel, and correlate all the activities in radiography, magnetic particle, penetrant, ultrasonic, and other inspection processes. This requires liaison with the laboratory to develop new inspection techniques, co-ordination with the shop inspection to ensure that the non-destructive tests are properly



Fig. 2

Hypothetical quality control department

applied and interpreted, and the responsibility of seeing that all tests are made at the right time and place during the various construction stages.

Five criteria for judging the non-destructive tests are: (1) The numbers of tests made and their adequacy; (2) The decision to determine when tests are necessary; (3) Proper training of persons involved on the project; (4) Adequate equipment that is properly operating and calibrated; and (5) Sufficient allocation of time and funds for developing new techniques.

STANDARDS

It is important in any testing programme to meet the standards of acceptance and rejection that are to be used. This is recognized as a difficult task. One difficulty is the lack of adequate and meaningful information on the relationship of flaws and serviceability. Another problem is the design and development of realistic and useful "artificial flaws" for instrument calibration and technique development. In developing a technique through the use of artificial flaws, there is always the danger that the technique may be able to detect the artificial flaws but fail to detect real ones. Only after applying it satisfactorily to real flaws should the engineer be satisfied with a technique.

CODES AND SPECIFICATIONS

The basis for the design of reactor pressure-vessels in the United States is the American Society of Mechanical Engineers (ASME) Boiler and Pressure Vessel Code for Nuclear Vessels, Section III. The rules in the ASME code are minimum safety rules. They set a minimum quality level for the design and construction of a pressure vessel which can be stamped with the ASME code. The code rules are based on data and results derived primarily from experiment and experience. Thus, the code reflects what has proved to be good practice. An important aspect of standards is that, to be effective and useful, they must reflect the latest technological advances and keep abreast of industrial manufacturing capability.

Tables I and II give some of the American Society for Testing and Materials (ASTM) specifications applicable to nuclear-reactor pressure-vessels.

TABLE I

INSPECTION METHODS AND RECOMMENDED PRACTICES APPLICABLE TO REACTOR MATERIALS

Inspection technique	Purpose	ASTM standard	
Magnetic partícle	Surface inspection	E109, E138, E125, A275	
Liquid penetrant	Surface inspection	E165	
Radiography	Internal discontinuities (for sections up to 2 in thick)	E52, E71, E94, E99, E142	
Ultrasonic	Internal discontinuities	E113, E114, E164, A435, A388	
	Standards under development	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
Eddy-current	Internal discontinuities		
Radiography	Internal discontinuities (for sections 3, 6 and 12 in thick)		

The ASTM standards for material and techniques, which are mandatory, lay down minimum quality and safety specifications.

In addition to the ASME and ASTM codes and standards, there are a number of regulatory codes prepared by the military and other government agencies. Typical of these are: NAV Ships 250-1500, a standard for welding the coolant system and associated components for pressurized water-cooled systems of naval reactors; MIL-STD-271, a military standard giving non-destructive testing requirements for metals; United States Navy Qualification Procedures Code 981, issued by the Materials Laboratory, New York Naval Shipyard, Brooklyn, N.Y.; and MIL-STD 410, a military standard which covers the certification of personnel employed in penetrant inspection.

TYPES OF DEFECTS

There are certain characteristic defects found in the materials and processes used in pressure vessels. Flaking is found in heavy low-alloy steel forgings. Flakes are scattered short internal fissures. Such defects occur on cooling from the forging temperature due to the decreased solubility of hydrogen in the steel. Defects associated with heavy plates and forgings are segregations at the centre of the ingot. In rolled plate this segregation can take the form of open laminations or voids which result from either primary or secondary piping in the ingot. Another form of segregation is non-metallic inclusions, the main types being iron manganese sulphide, iron

W.J. McGONNAGLE

TABLE II

Component	Material	ASTM Specification
Reactor vessel		
Plate	Carbon-silicon steel	A212
	Low-alloy steel	A302
Forgings	Alloy steel	A336
Internal cladding	Austenitic stainless steel Inconel	
Flanges and fittings	Carbon steel	A A105
Flange bolts and nuts	Alloy steel	A193, A194
Primary piping	Stainless steel	A376, A312, A358
	Carbon steel	A106, A155
Valves, pumps and fittings	Stainless steel	A182, A351
Pressurizer	Carbon-silicon steel	A212
	Low-alloy steel	A 302
	Stainless steel	A240

MATERIALS FOR CRITICAL COMPONENTS IN CIVILIAN WATER-COOLED POWER REACTORS

silicate, and aluminium oxide. The first two are plastic at the rolling temperatures and form elongated inclusions with their major axis parallel to the rolling direction. Aluminium oxide inclusions are refractory at rolling temperatures and maintain their original form. A third type of segregation is banding, a separation of the structure into distinct carbon-rich and carbon-poor regions parallel to the surface of the plate. This latter type of structure can be minimized but not completely eliminated by a high-temperature diffusion treatment.

Weld cracking is a serious problem in pressure vessels. Cracks may begin in the heat-affected zone and spread into the weld deposit, or along the heat-affected zone of the weld, or may originate from weld defects.

Most reactor vessels have cladding on the carbon steel for corrosion protection. This material may be applied by rollbonding, deposit weldmetal resistance, welding, and brazing. The cladding must be well bonded to the base metal.

VISUAL EXAMINATION

One of the important non-destructive tests is a thorough visual examination of all plate surfaces, plate edges, and welds. For example, an experienced welding operator can detect surface defects as roped weld beads, incomplete fusion, excessive crown, excessive undercut on the weld groove, cracks, and surface porosity.

MAGNETIC-PARTICLE INSPECTION

The magnetic-particle inspection procedures to be followed are ASTM procedure: E-109, Dry Magnetic-Particle Inspection; E-138, Wet Magnetic-Particle Inspection; and A-275, Method of Magnetic Inspection of Heavy Steel Forgings.

Meaningful reference standards for magnetic-particle inspection are difficult to develop. Two such standards are suggested. One type consists of a plate of the appropriate material and thickness. Holes or slots of various sizes and depths are made in the plate. The plate is magnetized and the undisturbed surface is sprayed with magnetic powder. Such a plate will show if the magnetic field strength is high enough to yield magnetic-particle indications of defects. The second type consists of a plate with an artificial flaw. A wedge of the same material is placed on the uncut side of the plate. The system is magnetized. The thickness of the wedge through which the flaw can be detected with the magnetic particles indicates the sensitivity of the technique. As an additional aid, the ASTM has prepared Reference Photographs for Magnetic-Particle Indications on Ferrous Castings (E-125).

All indications revealed by magnetic-particle inspection are not necessarily defects because irrelevant indications are sometimes found. The inspector must prove that they are irrelevant by smoothing the surface and re-testing. If on re-test no indication is found, the initial one may be considered to be irrelevant.

In welds, all magnetic-particle indications in the weld craters or in the line of fusion with the base metal and weld metal should be classified as defects.

LIQUID-PENETRANT INSPECTION

When looking for cracks on non-magnetic material, liquid-penetrant inspection is permitted by the ASME code. In this inspection the ASTM procedure E-165, Liquid-Penetrant Inspection, should be followed. Reference standards for penetrant inspection are difficult to make since it is impossible to make two specimens with identical natural defects. Producing artificial cracks for penetrant inspection is difficult. One type of reference standard has been developed in the United Kingdom [1]. The ASME has proposed a comparative standard [2].

RADIOGRAPHY

The ASME code (Section III) requires that all welds which are subject to stress be fully radiographed. The radiographs can be made using either X-rays or gamma-rays. The radiography is to be done in accordance with ASTM standard E-94, Recommended Practice for Radiographic Testing. Other pertinent ASTM specifications are E-71, Industrial Radiographic Standards for Steel Castings; E-99, Reference Radiographs for Steel Welds; E-142, Controlling Quality for Radiographic Testing; and E-52, Industrial Radiographic Technology for Use in Radiographic Inspection of Castings and Weldments

Radiography should be done after heat treatment and stress relief. If micro-cracks or incipient cracks exist, they will tend to open up during heat treatment or stress relief which makes them more readily detectable by radiography.

All weld joints to be radiographed are to be prepared as follows: the weld ripples or weld-surface irregularities on both the inside and the outside of the weld are to be removed so that the weld surface merges smoothly into the plate surface. The finished surface of the reinforcement of all butt-welded joints may have a uniform crown not to exceed the values given by the ASME code. The purpose for this requirement is that there will be no irregularities in the weld which will mask or confuse the interpretation of the radiograph. Under any circumstances after the radiograph is made and there are indications of flaws, the radiograph should be compared very carefully with the surface of the weld. All radiographs must be free from handling and processing defects that would interfere with the proper interpretation of the radiograph.

ASTM specification E-94 gives the practical thickness ranges of steel which can be inspected using typical industrial X-ray and gamma-ray sources for a minimum 2-2T quality level of radiography. The double- or multiplefilm technique [3] is recommended to indicate the presence or absence of man-made flaws. Each film should be exposed to a density of at least 1.5 so that each one can be viewed separately or the film can be viewed superimposed.

The radiographic quality is determined by the image of a properly positioned image-quality indicator often called a penetrameter. The penetrameter must be made of radiographically similar material to the object being radiographed. For example, any steel, preferably stainless, may be used for steel. The detailed design and dimensions of the ASME penetrameter can be found in the ASME code (Section III).

For a quality level of 2%, the ASTM requires that the image of the 2-T hole and the outline of the penetrameter appear clearly on the radiograph. The density difference between the 2-T hole and the penetrameter image are to be the same as that between the edge of the penetrameter and the adjacent film area.

There should be at least one penetrameter used for each film exposed. The image-quality indicator is to be placed so that the plane of the penetrameter is normal to the radiation beam. The penetrameter should be placed on the side nearest the radiation source. When it is physically impossible to place a penetrameter on the source side, the penetrameter may be placed on the film side of the specimen. However, the specific procedure adopted in the latter case must be evaluated before use and the penetrameter sensitivity determined [4]. When a backing strip is used, or the weld is thicker than the base material, the penetrameter must be shimmed so that the thickness being radiographed under the penetrameter is the same as the total thickness through the weld. When the thickness of the metal is not uniform over the area covered by a single radiograph, the penetrameter thickness shall be determined by the mean thickness of the metal. It should be shimmed as shown in Fig. 3. When penetrameters are to be shimmed, the shim



Typical geometry of radiographic techniques

- (a) Single wall, no reinforcement, no back-up strip
- (b) Single wall, weld reinforcements, no back-up strip
- (c) Single wall, weld reinforcement, stainless cladding re-deposited over weld in base metal.
- P = penetrameter; Sh = shim; t_m = design material thickness upon which penetrameter is based; t_e = specimen thickness

should be of the same material as the material being radiographed. The shim should be larger than the penetrameter to show the presence of the shim. If clad material is being examined radiographically, the thickness of the base material determines the thickness of the penetrameter.

The film holder should be placed on the surface to be radiographed in such a manner that there is no gap between the surface and film holder. Markers in the form of lead arrows or other symbols should be placed beside the weld so that the position of the radiographs on the weld can be positively indentified. Likewise, lead letters should be affixed to each section of the weld being radiographed. These letters should appear on the radiograph to assure unequivocal identification of this section. In radiographing the continuous length of a weld, the separate radiographs should overlap sufficiently to ensure that no proportion of the weld is not radiographed.

Figure 3 shows welds typical of those made on a pressure vessel. The thickness of the penetrameter, the placement of the penetrameter, and the thickness of the shim are required. Figure 4 shows a nozzle weldment with the position of source, shim, and penetrameter shown. It is recommended that, for complicated geometrical weld joints, "trial" exposures with dif-

11



Fig. 4

Geometry of nozzle weldment inspection

ferent orientations of the source with respect to the weld be made before the final technique is decided on.

In the radiography of materials for pressure vessels, components, assemblies, and in the pressure vessel itself, the following information should be available to the inspector: (1) Complete drawing of the vessel and components, so that the inspector can make the radiographic layout showing exactly the placement of all film; (2) how the films are to be coded for future reference; and (3) complete details concerning the radiographic procedure to be used.

The ASME code requires that all films should be kept for at least five years. All exposed film should be stored in such a manner that it is protected from the effect of light, pressure, excessive heat, excessive humidity, damage by fumes, vapours, and penetrating radiation. Film manufacturers should be asked for detailed recommendations on film storage.

The acceptance and rejection specifications should be detailed. Any weld which shows evidence of the following defects should be rejected: any type of crack-like indication any region of incomplete fusion or penetration, any slag, inclusions, or porosity in excess of that shown in the porosity chapters of the applicable ASME code. In the interpretation of a radiograph, the entire film should be viewed for the presence of any defects, not just the weld area. For example, in the case of clad material, the clad adjacent to the weld area should be scrutinized for possible cracks and other flaws.

ULTRASONICS

Ultrasonic inspection is being used and accepted as a quality control tool for base metals and welds in nuclear-reactor pressure-vessels. The ultrasonic inspection of low-alloy carbon steel-plate material such as A212-B or A302-B is required by Section III of the ASME code for reactor pressurevessels. A general recommendation is that all plate material over 4 in thick be ultrasonically tested.

The ultrasonic testing should be performed on the plate material in the final heat-treated condition. Surfaces that are rough, pitted, or contain a heavy scale or a loose coating should be sanded. A surface finish of 250 RMS is generally considered adequate. In making this inspection it is suggested that a grid pattern with the lines 9-12 in apart be marked on the plate. After the calibration of the ultrasonic instrumentation, the plate should be scanned along the grid lines. The inspection can be done from either side of the plate. The technique recommended is the ASTM specification E-114, Ultrasonic Testing by the Reflection Method Using Pulsed Longitudinal Waves Induced by Direct Contact. A procedure for the ultrasonic inspection of rolled carbon and alloy steel plates 3/4 in thick and over is given in the ASTM specification A-435, Ultrasonic Testing and Inspection of Steel Plates of Firebox and Higher Quality. The frequency used will be governed by the grain structure in the plate. A frequency of 1-5 mc should be used. It is recommended to test at the highest possible frequency compatible with good detectability. A 3/4-in or 11-in-diam. longitudinal wave transducer is recommended. If no ultrasonic signs of defects are found the plate is acceptable. Locations where the back surface reflection changes more than 10%, or where it is greatly attenuated, or where a defect indication appears, should be investigated in detail.

When signs of gross discontinuities are detected along a given grid line, the 9-12-in squares surrounding these signs should be scanned over 100% of their areas. The complete scanning of all additional 9-12-in squares should continue until the boundary areas containing discontinuities are established. Any complete loss of back reflection encountered during scanning should be further explored to determine the size of the indication. A rejectable defect in plate material is usually considered to have an area which gives complete loss of back reflection when the transducer is moved 2 in in any direction. DROUILLARD [5] states that shear-wave testing is also necessary to detect and locate such conditions as transverse cracks, surface folds, shrinkage cavities, and laminar-type separations or over-rolling.

A test block should be used to calibrate the ultrasonic instrumentation for plate inspection. A block should be made for each plate thickness used and should contain a $\frac{1}{2}$ -in-diam. flat-bottom hole drilled to a depth of approximately one-third of the plate thickness. Material for the test block must be free from internal discontinuities and have the same heat treatment, chemical analysis, physical, and mechanical properties as the plate material being tested. In calibrating the ultrasonic instrumentation, the sensitivity should be adjusted to give nearly full-screen height for the back reflections.

One of the requirements of all cladding is that it must be well bonded. Ultrasonic inspection is a useful and adequate method of evaluating cladding for defects and lack of bond. DROUILLARD [5] suggests the use of Lamb waves for evaluating weld clad. The test surface should be free of dirt, machining or grinding particles, and loose scale. The surface should be free of waviness to permit good contact with the transducer. The reference standard for testing cladding should be prepared by depositing or attaching the clad of the correct thickness to the proper thickness and type of base material. To simulate lack of bonding, the backing material should be removed from a portion of the standard, leaving only the clad. Reflection patterns should be determined for areas of clad only, and for areas of clad plus base material.

Normally ring forgings and tubular products used in reactor vessels are inspected by ultrasonic techniques. Applicable ASTM specifications are A-388, Recommended Practice for Ultrasonic Testing and Inspection of Heavy Steel Forgings, and E-113, Recommended Practice for Ultrasonic Testing by the Resonance Method. The ring forgings for the closure represent the thickest sections on the vessel and are usually tested using longitudinal and shear waves. In the case of the longitudinal inspection technique, the standard test block is a section of forging of similar thickness with flatbottom drilled holes. The technique used is similar to that described for plate. Because of the individual characteristics of forgings of this size, it is a general practice to place the shear-wave standard defect in the actual forging. It is usually 3% of the forging thickness and a reasonable length. Some specifications use 5% requirements. On tubular products it is sometimes required that the product be scanned in both directions either by sending the product through the mill twice, or by employing multiple-crystal techniques.

The procedure to be used in the ultrasonic inspection of welds should be in accordance with ASTM E-164, Ultrasonic Contact Inspection of Weldments. Most of the ultrasonic inspection of butt welds is done with the pulse-echo shear-wave technique. The reinforcing weld-bead overlay may cause unwanted and spurious signals during ultrasonic inspection. Usually for ultrasonic testing it is only necessary that the gross surface irregularities be removed and that the deposited weld metal merge smoothly into the surface of the parent metal.

Austenitic stainless-steel welds are difficult to test by using ultrasonics. This is because of the grain structure and grain orientation in such welds. One way to help overcome this problem is to use higher intensity ultrasonic waves, lowering the test frequency and using focused ultrasonic transducers.

As in the case of radiography, the inspector should be provided with a detailed drawing of the vessel and the inspection report should be "keyed" to the drawing designations and positions.

In the manufacture of a nuclear-reactor pressure-vessel to date, most of the ultrasonic testing has been done by the manual-scanning contact technique. In the contact technique the most efficient use involves a two-man team. One man operates the transducer, concentrates on the scanning technique, controls the direction of the scan, indexes the transducer with respect to reference, and determines that the couplant is always adequate and properly maintained. The other team member devotes his efforts to watching the screen of the oscilloscope and interpreting the sonic indications.

The ultrasonic instrument must be calibrated before every application by means of test blocks. Ultrasonic reference plates must be provided for checking instrument sensitivity, for instrument calibration, and for comparison with defect indication. The proper care of these test blocks must be part of the maintenance programme for the equipment.

CONCLUSION

Any organization with the proper managerial direction, adequate technical support, and proper consideration and attention to all details can make a nuclear-reactor pressure-vessel which meets the required nuclear, safety, and specific requirements. Non-destructive testing properly utilized helps to ensure that the required quality level is achieved.

REFERENCES

- [1] ROBERTS, R.W. and DUDBRIDGE, A.D., Metallurgia (1957) 311-312.
- [2] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, Section N627.6, American Society of Mechanical Engineers, New York.
- [3] McGONNAGLE W.J., Non-destructive Testing, McGraw-Hill Book Company, New York (1961).
- [4] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, Section 624. 1, American Society of Mechanical Engineers, New York.
- [5] DROUILLARD; T.F., Ultrasonic Inspection of Critical Weldments for Pressure Vessels and Nuclear Components, Spring Convention of the Society of Non-destructive Testing, Cleveland (1962).

DISCUSSION

R. SHARPE: Reference is made in your paper to the problem of ultrasonically testing austenitic stainless-steel welds. Can you tell us of any current work in the United States of America aimed at this particularly difficult problem?

D.W. BALLARD: I have no personal knowledge of this problem, and suggest you contact Dr. McGonnagle directly for further details.

P. de MEESTER (Chairman): A very interesting point about the philosophy of non-destructive testing was raised previously by Dr. Sharpe, namely, what tests are really necessary and how should specifications be written. Is any attempt being made, for example, in the USA, to get together all the people concerned in fabrication, quality control and reactor operation to try and settle this point? I think this should be combined with irradiation experiments on defective components. Do you know of any programme on this question?

D.W. BALLARD: There are a number of comprehensive studies under way in the USA and elsewhere attempting to correlate defect sizes and types with end effects on serviceability of the components being tested. Unfortunately, we have not had enough experience with these studies to move very far from our ultra-conservative approach to quality requirements. More work in this area is badly needed to save valuable time and the expenses of over-inspection.

O.A. KELLERMANN: Figure 1 of the paper shows a hypothetical plan of organization of the inspection group within the company. In the Federal Republic of Germany we are working with independent inspection authorities and have had good experience with this method. Can you tell us how the inspection groups are really organized in the companies and how they depend on the production manager? D.W. BALLARD: There are no standard organization structures in our country. In some instances the Inspection or Quality Control departments report directly to the Production Manager, while in other corporations the Quality Control Department is entirely separate from Production. I would say the tendency is to place inspection and quality control in separate organizations so that they can be entirely independent in exercising their responsibility.

MÉTHODES DE CONTRÔLE UTILISÉES AU DÉPARTEMENT DE MÉTALLURGIE POUR LES ÉLÉMENTS DE STRUCTURE ET LES ÉLÉMENTS COMBUSTIBLES

MARIE-THÉRÈSE DESTRIBATS, C. ALLAIN, A. PROT ET P. THOMÉ CENTRE D'ÉTUDES NUCLÉAIRES DE SACLAY, FRANCE

Abstract — Résumé — Аннотация — Resumen

CONTROL METHODS USED IN THE DEPARTMENT OF METALLURGY FORSTRUCTURE AND FUEL ELEMENTS. Studies of various reactor types undertaken by the Commissariat à l'énergie atomique have led to the use and development of many non-destructive methods of testing the various materials employed in their construction, and especially methods involving the use of X- and γ -rays, ultrasonic waves and eddy currents.

A summary is given below of the tests carried out during the construction of EDF (graphite gas) and EL 4 (heavy water) reactor types and of co-laminated elements. Emphasis is laid on certain typical aspects of these various methods, some of which are well known.

EDF type: ultrasonic measurement of the wall thicknesses of uranium or uranium alloy tubes; gammaradiographic detection of voids in the tubes; ultrasonic inspection following heat treatment of the tubes; ultrasonic flaw detection (inclusions, pipes) in billets and rough casts for MgZr cladding; leak-tightness testing of slugs by helium eliquation.

EL4 type: ultrasonic and eddy-current measurements of the wall thicknesses of Zircaloy pressure and guide tubes; ultrasonic inspection of Zircaloy pressure tubes and stainless-steel cladding tubes; in vacuo radiography of Be claddings; leak-tightness testing of pencils by helium eliquation.

Co-laminated elements: cladding thickness measurements by pulsed eddy currents; determination of core position in tubes and plates, using X-rays, gamma counting and pulsed eddy currents; checking of fuel homogeneity by gamma counting; ultrasonic and gamma-radiographic flaw detection in ZrU billets; detection of unbonded areas in plates, using ultrasonic waves, pulsed eddy currents and resistivity measurements.

The methods have been developed for industrial use. Several of the inspections already constitute routine manufacturing procedures, others will be introduced shortly and a further number are likely to come into use at a later date.

MÉTHODES DE CONTRÔLE UTILISÉES AU DÉPARTEMENT DE MÉTALLURGIE POUR LES ÉLÉMENTS DE STRUCTURE ET LES ÉLÉMENTS COMBUSTIBLES. Les études de divers types de réacteurs entreprises par le CEA ont conduit à utiliser et à mettre au point de nombreuses méthodes de contrôle non destructif pour les différents matériaux entrant dans leur réalisation, en particulier: radiographie et gammagraphie, méthodes ultrasonores et courants de Foucault.

Le mémoire décrit les contrôles effectués au cours de la fabrication des réacteurs des filières EDF (graphitegaz) et EL4 (eau lourde) et des éléments colaminés. Les auteurs insistent sur quelques points caractéristiques de ces diverses méthodes, dont certaines sont bien connues.

Filière EDF: mesure des épaisseurs des parois des tubes en uranium ou uranium allié, par ultrasons; recherche des cavités de ces tubes, par gammagraphie; contrôle des traitements thermiques de ces tubes, par ultrasons; recherche des défauts (inclusions, criques), par ultrasons dans les billettes et ébauches des gaines en MgZr; contrôle de l'étanchéité des cartouches, par ressuage d'hélium.

Filière EL4: mesure des épaisseurs des parois des tubes de force et de guidage en Zircaloy, par ultrasons et courants de Foucault; examen des tubes de force en Zircaloy et tube de gaine en acier inoxydable par ultrasons; radiographie sous vide des gaines en Be; contrôle d'étanchéité des crayons, par ressuage d'hélium.

Eléments colaminés : mesure de l'épaisseur des gaines, par courants de Foucault pulsés; recherche de la position de l'âme sur tubes et plaques, par radiographie, comptage gamma et courants de Foucault pulsés; contrôle de l'homogénéité du combustible, par comptage gamma; détection des défauts dans les billettes en ZrU, par ultrasons et gammagraphie; recherche des zones décollées des plaques, par ultrasons, courants de Foucault pulsés et mesure de résistivité.

Ces mises au point ont été faites en vue de leur utilisation industrielle. Plusieurs de ces contrôles sont effectués couramment en cours de fabrication, d'autres le seront prochainement et certains sont susceptibles de l'être à plus longue échéance.

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ СТРУКТУРЫ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ДЕПАРТАМЕНТЕ МЕТАЛЛУРГИИ. Начатое в КАЭ изучение различных типов реакторов привело к использованию и разработке многих методов недеструктивного контроля различных материалов, в частности радиографии, гаммаграфии, ультразвуковых волн и метода токов Фуко.

Ниже говорится о контроле в процессе строительства реакторов системы EDF (графитras), EL4 (тяжелая вода) и изготовления совместно прокатанных элементов. Выделены некоторые характерные моменты этих различных методов, часть которых хорошо известна.

Система EDF: измерение толщины стенок труб из урана или из уранового сплава ультразвуком; выявление полостей в этих трубках с помощью гаммаграфии; контроль за термической обработкой ультразвуком этих труб; изучение дефектов (вкрапления, трещины) ультразвуком в слитках и заготовках оболочек из MgZr; контроль за герметичностью топливных элементов с помощью гелия.

Система EL 4: измерение толщины стенок силовых труб и направляющих труб из циркаллоя с помощью ультразвука и токов Фуко; проверка с помощью ультразвука труб из циркаллоя, рассчитанных на давление, и трубчатого покрытия из нержавеющей стали; вакуумная радиография оболочек из Ве; контроль герметичности стержней с помощью гелия.

Совместно прокатанные элементы: измерение толщины покрытия пульсирующими токами Фукс; выявление положения сердечника по отношению к трубам и пластинкам с помощью радиографии, счета гамма-частиц и пульсирующих токов Фукс; контроль за гомогенностью топлива методом счета гамма-частиц; обнаружение трещин в слитках из ZrU с помощью ультразвука и гаммаграфии; выявление отслоенных участков пластинок с помощью ультразвука, пульсирующих токов Фукс, а также измерение удельного сопротивления.

Эти разработки были предприняты с учетом их промышленного применения. Некоторые из этих методов контроля применяются в процессе производства, другие найдут свое применение в ближайшем будущем, а ряд методов вероятно войдет в практику позднее.

METODOS DE CONTROL UTILIZADOS EN EL DEPARTAMENTO DE METALURGIA PARA LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y COMBUSTIBLES. Los estudios del Commissariat à l'Energie Atomique sobre diversos tipos de reactores indujeron a utilizar y a perfeccionar numersos métodos no destructivos destinados a inspeccionar los distintos materiales que intervienen en la construcción de esos reactores; en particular radiografía y gammagrafía, métodos ultrasónicos y empleo de corrientes de Foucault.

A continuación se enumeran las operaciones de control llevadas a cabo durante la construcción de reactores pertenecientes a las familias EdF (grafito-gas) y EL4 (agua pesada), y de elementos colaminados; se hace hincapié en ciertos aspectos característicos de estos métodos, algunos de los cuales son ya bien conocidos.

Familia EdF: métodos ultrasónicos para medir el espesor de las paredes de tubos de uranio o aleación de uranio; localización de las cavidades en esos tubos por gammagrafía; empleo de medios ultrasónicos para control de los tratamientos térmicos a que se someten los tubos; empleo de procedimientos ultrasónicos para buscar fallas (inclusiones, grietas) en las palanquillas y barras con que se elaboran las vainas de Mg-Zr; control de la estanqueidad de los elementos mediante exudación de helio.

EL 4: uso de métodos ultrasónicos y corrientes de Foucault para medir espesores de pared en tubos de Zircaloy, sean de fuerza o de guía; empleo de métodos ultrasónicos para inspeccionar tubos de fuerza de Zircaloy y vainas de acero inoxidable; radiografía al vacío de vainas de Be; control de la estanqueidad de barras huecas mediante exudación de helio.

Elementos colimados: medida del espesor de vainas mediante el empleo de corrientes de Foucault pulsadas; verificación de la posición del alma en tubos y placas mediante radiografía, recuento gamma y aplicación de corrientes de Foucault pulsadas; control de la homogeneidad del combustible por recuento gamma; detección de defectos en barras de Zr-U mediante procedimientos ultrasónicos y gammagráficos; determinación de las zonas despegadas en placas, empleando métodos ultrasónicos, corrientes de Foucault pulsadas y medición de resistividad.

Estos métodos se han desarrollado con miras a su utilización industrial. Algunos de ellos se aplican ya corrientemente durante la fabricación; otros se utilizarán próximamente y el resto es susceptible de aplicación a más largo plazo.

1. INTRODUCTION

En guise d'introduction à ce mémoire, dans lequel sont exposées succintement différentes méthodes de contrôle utilisées aux Services de technologie de Saclay, nous désirons faire quelques remarques destinées à situer ces activités de contrôle dans le cadre général des recherches et du développement des éléments combustibles et des éléments de structure.

Les qualités exigées dans la construction des réacteurs sont tout d'abord la sécurité et l'efficacité de fonctionnement, et, en second lieu, l'économie.

On s'efforce habituellement de définir la sécurité par des «facteurs de sécurité» qui, dans les constructions classiques, sont le fruit d'une longue expérience industrielle et tiennent compte des incertitudes de fabrication. Le développement de l'énergie nucléaire a créé une situation nouvelle:

a) Dans certains problèmes relativement classiques de construction, la connaissance des phénomènes et les contrôles effectués réduisent «l'incertitude», et il faut remettre en cause des «facteurs de sécurité» depuis longtemps admis, qui condamneraient des solutions intéressantes.

b) A l'opposé, et ce sont les cas les plus nombreux, on connaît mal les sollicitations auxquelles seront soumises, en pile, certaines pièces. En général on tourne le problème par des essais d'irradiation dans des boucles, essais aussi représentatifs que possible des conditions de fonctionnement prévues ultérieurement en pile. Bien que ces essais puissent être concluants en ce qui concerne la sécurité, par contre on ne peut parler de «facteur de sécurité», puisqu'on ne connaît toujours pas les sollicitations; dès lors la détermination d'un seuil de rebut à partir de contrôles non destructifs devient une décision arbitraire. Ceci est en particulier le cas pour les éléments combustibles où des méthodes de contrôle extrêmement sensibles ont été mises au point ces dernières années.

c) Les méthodes d'examens non destructifs constituent un facteur de progrès important dans la technologie:

- pour la recherche fondamentale des procédés;
- parce qu'elles permettent l'amélioration et le contrôle des éléments et le choix des meilleurs produits.

Cependant, il est souvent très difficile de disposer d'une méthode d'essai qui soit à l'image des conditions de fonctionnement - ce qui est pourtant le désir essentiel des utilisateurs.

2. PROBLÈMES DE CONTRÔLE DES ÉLÉMENTS COMBUSTIBLES DES RÉACTEURS GRAPHITE-GAZ (G2-EDF)

En ce qui concerne le combustible, on effectue des contrôles dimensionnels, on recherche les défauts éventuels, et on contrôle le traitement thermique selon la nature de l'alliage utilisé. Pour le matériau de gaine on recherche systématiquement les défauts sur les billettes et sur quelques ébauches. Enfin, sur l'élément combustible lui-même on procède à la détection des fuites.

Sans entrer dans le détail de chacune de ces méthodes, qui sont certainement bien connues, nous étudierons quelques points particuliers.

2.1. Mesures dimensionnelles des tubes en uranium

Il s'est révélé nécessaire d'effectuer la mesure de l'épaisseur des parois des tubes en uranium afin d'éviter d'introduire dans le réacteur des éléments présentant un excentrement important, et par suite susceptibles de se déformer rapidement (flambage circulaire).

Ces mesures sont faites par ultrasons à une fréquence de 5 MHz sur toute la longueur de la pièce totalement immergée. Ce contrôle se fait après usinage, et après traitement thermique si l'échantillon le subit. Pendant le contrôle, l'échantillon est animé d'un mouvement hélicoïdal.

Dans certains cas on accepte un excentrement de 1 mm; la précision des mesures est de l'ordre de 0,05 mm. Le rebut à la suite de ce contrôle est d'environ 1%.

L'appareil utilisé pour ce contrôle est un «microradarultrasonics» qui envoie un signal d'émission rapide (montée 20 ns, durée 0,2 μ s) qui subit une série de réflexions successives. On déduit l'épaisseur en mesurant le temps qui sépare deux réflexions sur une face interne et une face externe (fig.1a). Les lectures sont effectuées soit sur un galvanomètre, soit sur un enregistreur.



Figure 1

Mesure des épaisseurs des tubes en uranium par ultrasons.
L'étalon de mesure est un tube dont l'intérieur est usiné en gradins de 5/100 mm et qui est pourvu à une extrémité d'un orifice excentré qui permet de contrôler la proportionnalité entre la hauteur de la mesure et l'épaisseur du tube (fig.1b). On a noté qu'il était nécessaire que le temps de réponse de l'amplificateur soit suffisamment court pour éviter une distorsion des signaux (fig.1c).

D'autre part, en augmentant la fréquence de réponse du scripteur de l'enregistreur, on élimine les irrégularités d'enregistrement dues à la présence de cavités ou de porosités (ces dernières se traduisent par l'extinction de l'écho de fond, ou par l'apparition de l'écho de défaut). Quelques essais ont été faits avec des traducteurs focalisants; la sensibilité des mesures était à peine supérieure à celle obtenue avec des traducteurs ordinaires de 10 mm de diamètre, et les réglages étaient plus difficiles à effectuer.

2.2. Recherche des cavités des tubes en uranium

Pour ce contrôle, on emploie la radiographie, qui est une méthode qui a fait ses preuves depuis longtemps dans le domaine du contrôle en fonderie. Des considérations d'ordre économique et technique nous ont conduit à adopter le cobalt-60 comme source de rayonnement, pour les raisons suivantes:

- énergie élevée du rayonnement gamma: 1,25 MeV (moyenne);
- période relativement élevée: 5,3 a;
- activité spécifique élevée: $35 \text{ Ci pour } 4 \times 5 \text{ mm}$;
- entretien de l'appareillage pratiquement nul (par rapport aux sources de rayons X de même énergie).

Il est nécessaire de choisir une distance source-film suffisante pour que le flou dû aux dimensions de la source soit le plus petit possible, sans pour autant que le temps de pose soit excessivement long.

Compte tenu des dimensions de la source utilisée $(4 \times 5 \text{ mm})$ et de son intensité (35 Ci), une distance source – film de 1,40 m a été adoptée; cette valeur conduit à des temps de pose de l'ordre de 90 min pour les dimensions des tubes EDF (18×40 et 23×43 mm), avec des écrans renforçateurs en plomb de 0,2 mm (l'écran antérieur protège en même temps le film des effets autoradiographiques de l'uranium). La forme cylindrique des éléments oblige à faire deux expositions dans deux plans perpendiculaires, pour faire apparaître les défauts situés dans les régions de plus forte épaisseur. Une exposition panoramique (rayonnement dans 360°) permet de radiographier simultanément plusieurs dizaines d'unités.

Dans les spécifications techniques, il a été défini une dimension minimale de défaut détectable (1,5 mm plutôt qu'une sensibilité en pour-cent).

Pour les normes de qualité des tubes, chaque dimension de cavité audessus du minimum détectable est affectée d'une note. Chaque tube reçoit trois notes:

a) le nombre total de points correspondant à tous les défauts,

b) le nombre de points pour une certaine longueur de tube (40 mm),

c) le nombre de points correspondant à la plus grosse cavité.

Des seuils ont été fixés, au-delà desquels les tubes sont mis au rebut. Il faut noter que le contrôle gammagraphique se révèle un auxiliaire précieux du contrôle ultrasonore du traitement thermique en levant le doute qui peut exister quant aux cavités et régions à gros grains.

1 1 A A

Ce contrôle a également permis de faire des progrès dans le domaine de la fusion et de la coulée de l'uranium et d'éviter l'apparition des soufflures et des retassures: double coulée sous vide, coulée en moules préchauffés etc.

2.3. Contrôle des traitements thermiques des alliages d'uranium par ultrasons (fig. 2)

Afin de pouvoir maintenir les éléments combustibles plus longtemps dans les réacteurs sans risque d'incidents, il a fallu mettre au point un certain nombre d'alliages susceptibles, après traitement thermique, d'avoir des grains fins et homogènes, sans orientation préférentielle, c'està-dire ayant une bonne stabilité dimensionnelle sous rayonnement [1].



×2,5



Pour s'assurer de la finesse et de l'homogénéité de la structure de l'élément, il était nécessaire d'effectuer un contrôle sur la totalité de l'élément. Ce contrôle peut se faire par ultrasons en comparant l'énergie ultrasonore transmise par l'élément étudié à celle d'un étalon de même forme géométrique dont la taille du grain est connue.

Ce contrôle s'effectue par immersion totale, le mouvement étant hélicoidal avec un pas inférieur à 5 mm. La fréquence est de 3 ou 5 MHz selon l'alliage (3 MHz pour les alliages présentant des grains relativement gros, 5 MHz pour ceux ayant des grains très fins). Tous les combustibles en uranium faiblement allié sont contrôlés ainsi, quelles que soient leurs dimensions: les diamètres intérieur et extérieur des tubes vont respectivement de 20 et 35 mm à 70 et 95 mm, les diamètres des barres vont de 30 à 45 mm [2].

2.4. Contrôle des billettes et ébauches en Mg-Zr

Les billettes en Mg-Zr sont examinées par ultrasons avant leur transformation. En raison des défauts observés depuis quelque temps sur les gaines, un contrôle total des billettes a été demandé. Auparavant on effectuait un contrôle suivant deux génératrices, actuellement ce contrôle est fait par écho et immersion totale, avec des ondes longitudinales. La fréquence est de 3 MHz, le palpeur est en titanate de baryum, d'un diamètre de 10 mm.

Les billettes sont écroûtées et dégraissées. Le pas d'examen est de l'ordre de 5 mm, les échos de défauts sont enregistrés (fig. 3). Des défauts inférieurs à 2 mm de long sont facilement repérables sur des billettes de 150 mm de diamètre. Les normes de rebut seront fixées suivant les résultats d'un examen statistique. Il faut remarquer que les zones présentant des défauts sont riches en Zr [3].

Parallèlement une série d'ébauches de gaines filées d'un diamètre intérieur de 36 mm et extérieur de 56 mm a été examinée. Ces ébauches devaient être des gaines internes des éléments prototypes d'un diamètre intérieur de 54 mm et extérieur de 70 mm. Une recherche des défauts longitudinaux et transversaux a été faite avec des ondes transversales et par immersion totale. Cette recherche ne peut pas être faite simultanément pour les défauts longitudinaux et transversaux en raison des interférences qui se produisent entre les deux appareils qui ne sont pas synchronisés. Le contrôle est beaucoup plus sensible pour les défauts transversaux que pour les défauts longitudinaux. Des défauts transversaux internes de 0,4 mm de long (direction perpendiculaire à la direction du filage), de 0,1 mm de large et de profondeur inférieure à 0,1 mm ont été observés (fig.4). De même des défauts longitudinaux internes et de surface de 1 à 30 mm de long (direction parallèle à la direction du filage), de 2 à 0,2 mm de large et de 2 à 0,02 mm d'épaisseur ont pu être détectés (fig. 5). La sensibilité est meilleure pour les défauts internes et de surface interne que pour les défauts de surface externe.

Une des grosses difficultés rencontrées au cours de cette étude a été le problème des «bulles». Etant donné les délais très courts qui nous étaient imposés et l'installation dont nous disposions, nous avons été obligés d'adopter une solution rudimentaire consistant dans le dégraissage des tubes,



Contrôle par ultrasons de billettes Mg-Zr.

Figure 3





LONGUEUR < 0,1mm LARGEUR 0,5mm ÉPAISSEUR 0,01mm



PERPENDICULAIRE À L'AXE x 150

Figure 4



leur balayage avec un pinceau et jet d'eau continu sur le traducteur. C'est probablement une des raison qui expliquent une sensibilité moins grande pour les défauts de surface.

Nous avons actuellement en cours d'étude le contrôle systématique de toutes les gaines élaborées utilisées dans les réacteurs. Ce contrôle se fera par courants de Foucault.

3. PROBLÈMES DE CONTRÔLE ASSOCIÉS AU RÉACTEUR EL4

EL4 est un réacteur prototype dans lequel les éléments de structure ont fait l'objet de fabrications spéciales ou originales. Il a fallu effectuer de façon systématique des contrôles semblables à ceux que l'on demande pour les éléments combustibles; cependant l'effort principal a porté sur le contrôle des gaines en acier inoxydable, en béryllium ou en Zr-Cu.

3.1. Recherche des défauts des tubes de force en Zircaloy

Ces tubes sont réalisés en Zircaloy-2, leurs dimensions sont les suivantes:

diamètre = 107 mm, épaisseur = 3 mm, longueur = 4,270 m.



Figure 5

Ebauche de gaine Mg-Zr de 37 mm x 56 mm de diamètre. Défaut longitudinal.

Le contrôle est réalisé par ultrasons à l'aide d'ondes transversales; une étude préliminaire avait montré tout l'intéret d'une technique par immersion qui éliminait les difficultés de couplage et autorisait l'emploi de traducteurs droits convenablement collimatés et disposés pour obtenir un angle de réfraction correct [4].

La solution adoptée pour la fabrication par la Société Vallourec comporte l'utilisation d'un chariot porte-traducteurs, simplement posé sur le tube, le couplage étant assuré par un film d'eau (fig.6).

Dans l'un ou l'autre cas, il est possible de déceler au maximum d'amplitude un défaut sur la surface extérieure ou intérieure, constitué soit par une rayure de 3 mm de long et de 0,1 mm de profondeur, soit par un trou borgne de 0,5 mm de diamètre et de 0,5 mm de profondeur. Seule la détection des défauts longitudinaux a été envisagée.

La mesure de l'épaisseur de ces tubes a tout d'abord été réalisée par un procédé métrologique classique permettant le contrôle sur une ou plusieurs sections, avec enregistrement. Elle est orientée maintenant vers l'utilisation d'un procédé d'examen continu par résonance d'ultrasons (Vidigage).



Figure 6 Contrôle industriel des tubes de force El.4.

Outre ces deux méthodes, un contrôle radiographique a également été mis au point. Il a permis pendant la phase d'étude le contrôle de tronçons de l'ordre de 400 mm en trois vues successives.

3.2. Mesures dimensionnelles des tubes de guidage

Les tubes de guidage du réacteur EL4 ont 5 m de longueur, un diamètre extérieur de 100 mm et une épaisseur de 1,1 mm; ils sont en alliage Zr-Cu-Mo. Hormis une métrologie de la circonférence il n'est pas prévu de contrôle spécial, en raison de leurs conditions d'utilisation. Une étude préliminaire a cependant été entreprise dans le but de mesurer l'épaisseur des tubes, en vue d'un contrôle après un certain temps de fonctionnement dans le réacteur. Cet examen des structures irradiées serait éventuellement effectué dans le réacteur et devrait renseigner sur les corrosions.

Des essais préliminaires ont été faits à l'aide de trois méthodes: impulsions ultrasonores, courants de Foucault, classiques et pulsés. Les résultats rapportés sont relatifs à un tube à gradins non corrodé (fig. 7).

Le contrôle par ultrasons permet d'obtenir une bonne précision de mesure indépendante des variations de température, par contre cette méthode nécessite un montage très soigné des traducteurs et un milieu de couplage dont la constance de l'épaisseur est essentielle.



MÉTROLOGIE



IMPULSIONS ULTRASONORES



COURANTS DE FOUCAULT (RADAC)



COURANTS DE FOUCAULT PULSÉS

Figure 7

Mesure de l'épaisseur d'un tube en Zircaloy. Métrologie classique - ultrasons - courants de Foucault sinusoïdaux et pulsés. Le contrôle par courants de Foucault (fig.8) fournit une précision semblable mais est très sensible aux variations de température. La méthode ne nécessite pas de milieu de couplage.



Sensibilité des différentes méthodes par rapport à la métrologie.

Le contrôle par ultrasons paraîtrait donc le mieux adapté à la mesure des épaisseurs du tube de guidage, mesure s'effectuant avantageusement en même temps que la recherche des défauts longitudinaux et transversaux. On peut néanmoins espérer une amélioration des performances obtenues par la méthode des courants de Foucault. Les présentes conclusions ne sont en effet valables qu'en fonction des appareillages utilisés.

Cette dernière remarque conduit à envisager pour la mise au point une tête suiveuse (fig.9) susceptible d'être utilisée pour les deux méthodes: ultrasons et courants de Foucault. Cette tête, montée sur un banc, permettrait une exploration relativement rapide de l'ordre de 15 à 20 min pour un tube de 5 m de long. La sonde doit non seulement être normale à la surface de l'élément à contrôler, mais rester à distance constante et ceci quelles que soient les irrégularités du tube.



Figure 9 Avant-projet de tête suiveuse,

Le dispositif réalisé comporte un corps cylindrique prenant appui à l'aide de quatre billes, et à l'intérieur duquel coulisse le porte-sonde, l'ensemble étant équipé d'un système de rappel. La liaison avec le chariot s'effectue grâce à deux glissières à 90° et trois raccords souples.

Avec le système utilisé, nous n'avions pas une vitesse de translation régulière, la vitesse du moteur n'étant pas constante; aussi avons nous été amenés à construire un système de marquage par cellule photoélectrique (fig. 10): des rainures équidistantes assurent le passage des rayons lumineux d'une lampe munie d'un réflecteur qui les focalise sur la cellule. Celle-ci commande un relais par l'intermédiaire d'un transistor. Ce relais est relié à l'enregistreur.



Figure 10

Dispositif de marquage.

3.3. Recherche des défauts dans les gaines

3.3.1. Gaines en acier inoxydable

Ces gaines, dont les dimensions sont les suivantes: longueur = 454,5 mm diamètre intérieur = 11,07 + 0 mm + 0,03 mm épaisseur = 0.4 mm $\pm 0,02$,

ont fait l'objet d'une étude poussée du contrôle par ultrasons qui est relatée par ailleurs [5]. Signalons seulement que le matériel étudié et mis au point (fig. 11) permet la détection des défauts longitudinaux et transversaux, et éventuellement la mesure des épaisseurs par résonance ultrasonore (Vidigage). Un soin particulier a été apporté à l'étude mécanique de l'appareillage qui doit, pour des raisons de planning, associer recherches et production.

3.3.2. Gaines en béryllium

Les réacteurs de la filière EL4 sont normalement prévus pour fonctionner avec de l'oxyde d'uranium naturel gainé de béryllium. Compte tenu



Figure 11

Machine de contrôle industriel des tubes de gaines en acier inoxydable du réacteur ELA.

des propriétés de ce matériau, il a été nécessaire d'envisager un contrôle par radiographie, qui se prête particulièrement bien à la détection des inclusions et des autres types de défauts pouvant être rencontrés. Une difficulté provient de la transparence remarquable du béryllium au rayonnement X. Elle a été levée par la mise au point d'une technique permettant le contrôle à très basse tension (entre 4 et 7 kV). Après avoir repris les travaux effectués à Oak Ridge [6, 7] nous avons développé une technique de radiographie sous vide permettant des contrastes identiques à ceux que l'on peut obtenir sur des matériaux plus courants [8]. Les avantages en sont les suivants:

- films nu;

- disparition de l'absorption due à la colonne d'air ou d'hélium;

 réduction de la fenêtre du tube à rayons X à une épaisseur de quelques centièmes de millimètre (0,02 à 0,05 mm). Ainsi sont conservées au maximum les grandes longueurs d'onde du rayonnement incident, qui permettent l'obtention d'un bon contraste.

Le dispositif d'étude (fig. 12) permet l'examen de tubes ou de barres jusqu'à 120 mm de long. Une machine actuellement en cours de mise au point permettra la radiographie de tubes de 600 mm avec des temps de pose beaucoup plus courts. Les caractéristiques en seront les suivantes: - haute tension maximale: 20 kV:

on	maximare.	20	ر ۷ ۲۲
	minimale:	2	kV;
	nominale:	4	à 7 kV;



Figure 12

Dispositif de radiographie sous vide des tubes en béryllium.

- débit maximal: 250 mA;
- distance focale: 1600 mm;
- fover optique: $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$.

15 tubes de 13,2 mm \times 15,2 mm de diamètre pourront être radiographiés simultanément.

3.4. Contrôle d'étanchéité à l'hélium par spectrographie de masse

La détection des fuites par spectrographie de masse a complété depuis une vingtaine d'années la gamme des contrôles non destructifs [9]. Ce procédé direct, extrêmement sensible, permet la détermination du débit d'un gaz traceur, généralement de l'hélium à travers des trous, des porosités ou des fissures qui traversent complètement la pièce soumise au contrôle. Les détecteurs à hélium utilisés au CEA ont une sensibilité d'environ 10^{-12} atm \cdot cm³/s.

Dans la construction et l'exploitation d'un réacteur nucléaire, les conditions d'étanchéité sont rigoureuses si bien que la détection des fuites à l'hélium est devenue à chaque stade de fabrication le test ultime qui conditionne le rebut ou l'acceptation définitive de la pièce. Parmi les nombreux types d'essais d'étanchéité étudiés pour le réacteur EL4 on peut dégager trois exemples assez significatifs.

3.4.1. Contrôle d'étanchéité des raccords Zircaloy - inox vissés brasés [10]

Le banc de contrôle montré à la figure 13 est destiné à vérifier l'étanchéité des joints Zircaloy-inox avant soudage sur le tube de force. Chacun des 12 joints brasés à tester est fermé par des brides métalliques, relié par l'intermédiaire de vannes au spectrographe de masse et entouré par un manchon rempli d'hélium à une pression de 2 kg/cm². Après pompage du joint, une lecture du signal de fuite donne une première indication qui peut être complétée par une accumulation pour augmenter la sensibilité.



Figure 13

Banc de contrôle hélium pour joints Zircaloy - inox vissés brasés.

3.4.2. Contrôle de l'étanchéité des jonctions tubes de force - fond de cuve EL4 [11]

Au cours de la construction du réacteur, le contrôle d'étanchéité est fait systématiquement pour chaque jonction d'un tube de force à la cuve. La méthode est soit directe (fig.14): cuve remplie d'hélium, canaux sous vide; soit inverse (fig.15): cuve sous vide, canaux remplis d'hélium. Ces deux méthodes permettent de déceler des fuites inférieures à 10⁻⁴ lusec.



Figure 14

Outillage pour test du canal sur fond de cuve ElA.

3.4.3. Contrôle d'étanchéité des crayons EL4 par ressuage d'hélium [12]

Le ressuage d'hélium permet de tester l'étanchéité de pièces définitivement scellées comme c'est le cas pour les crayons EL4 gainés prêts à être mis en pile.

Ce procédé comporte deux étapes successives:

immersion dans une chambre remplie d'hélium à une pression de 35 kg/cm²;

 ressuage proprement dit dans une chambre de détection qui est pompée très rapidement, isolée pendant 15 min puis mise en communication avec le spectrographe de masse.

D'après les calculs théoriques et les premiers essais il semble que la sensibilité de ce contrôle appliqué aux crayons EL4 soit de l'ordre de 10⁻⁷ lusec.

4. RÉACTEURS PISCINES

Contrôle de l'homogénéité du combustible de plaques colaminées

Il est nécessaire de connaître la répartition du combustible le long d'un élément afin d'éviter les points chauds.

Un ensemble a été réalisé pour le contrôle automatique de l'homogénéité de la répartition en uranium enrichi des plaques gainées [13]. Le principe de l'appareil repose sur la propriété de l'uranium d'émettre un rayonnement gamma de 185 keV (²³⁵U) et un rayonnement gamma de 91 keV (²³⁸U).



Figure 15 Contrôle de l'étanchéité hélium. Méthode inverse.

L'activité mesurée par le détecteur à scintillation équipant l'appareil peut être considérée comme proportionnelle à la teneur en uranium [14, 15].

Les informations délivrées par le détecteur après intégration sont enregistrées pour permettre de suivre aisément les variations de concentration de ²³⁵U par comparaison avec une plaque étalon de même nature.

L'ensemble de la machine de contrôle se compose d'une partie mécanique et d'une partie électronique (fig.16). La partie mécanique est conçue pour permettre l'examen simultané de trois plaques par déplacement automatique de trois sondes à scintillation munies de collimateurs. Les sondes sont soumises à un déplacement longitudinal. Ces déplacements peuvent être motorisés ou manuels. L'avance motorisée se fait à la vitesse de 34 mm/min. Le serrage des plaques est automatique et commandé par air comprimé. La position verticale des détecteurs est réglable par vis micrométrique.

La partie électronique est constituée par un standard à trois chaînes semblables utilisées pour le comptage à scintillation, aboutissant à un enregistreur à trois voies MECI à commutation rapide.

Quelles que soient les précautions prises (bonne position des raies caractéristiques...) et pour permettre des comparaisons des plaques entre



Figure 16 Machine de contrôle de l'homogénéité. Vue d'ensemble.

elles, la référence à un étalon est indispensable avant et après chaque exploration, en raison du manque de stabilité de l'appareillage électronique et des légères différènces entre les trois voies. Il faut noter que les détecteurs ont été blindés par une chemise en plomb afin d'éviter l'influence d'une plaque sur sa voisine.

Il est apparu indispensable, en raison du phénomène de rétrodiffusion, que l'ensemble de la plaque repose sur un même support. D'autre part, après un étalonnage spécial il est possible de déterminer la position du combustible dans la plaque. La précision des mesures est de l'ordre de 1,5% de la teneur théorique.

5. CONCLUSIONS

En se fondant sur les quelques études qui ont été effectuées aux Services de technologie dans le domaine du contrôle non destructif, on peut faire le bilan suivant:

a) L'application de ces procédés a été et demeure essentielle pour les études en laboratoire des éléments combustibles (coulées et traitements thermiques d'alliages d'uranium, colaminage d'éléments combustibles plaques, etc.). b) La transposition des méthodes de laboratoire à la production industrielle a permis

- de signaler les dérives de fabrication et d'améliorer la qualité à divers stades de fabrication;
- de faire progresser les techniques de contrôle elles-mêmes en automatisant les procédés et en exigeant des électroniques plus stables, des mécaniques précises et robustes.

c) La détermination des seuils de rebut, primordiale du point de vue économique, est souvent très délicate. Par exemple, dans le cas des gaines d'éléments combustibles, les signaux correspondant à des défauts réels sont classés par rapport à des défauts «étalons»; par ailleurs des défauts identiques n'ont pas la même gravité lorsqu'il s'agit d'acier ou de Zircaloy que dans le cas du SAP ou du béryllium.

d) Il est donc nécessaire de compléter ces études de contrôle par des recherches sur les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces en pile (par exemple, mesures des déformations locales et des contraintes thermiques des gaines des éléments combustibles).

e) Enfin les progrès constants enregistrés dans les techniques des ultrasons et des courants de Foucault justifient un effort accru en vue du développement de ces procédés.

ŖÉFÉRENCES

- [1] LANIESSE, J. et AUBERT, H., Alliage d'uranium à faible teneur pour éléments combustibles, CEA R 2584 (1964).
- [2] DESTRIBATS, M.-T., CHERPENTIER, C., PAPEZYK, F. et PIGEON, M., Contrôle des traitements thermiques d'alliages d'uranium par ultrasons, voir ces comptes rendus.
- [3] CHAMPIGNY, M. et MENY, L., Contrôle de billettes en Mg-Zr au microanalyseur à sonde électronique, P. V. SRMA 65.38, CEA, Saclay (1965).
- [4] PROT, A.C., Contrôle par ultrasons des tubes de force EL4, Note CEA DM-T/342-N (1962) (à paraître).
- [5] PROT, A.C., FOULQUIER, H. M. et PEYROT, J. P., «Contrôle industriel par ultrasons des gaines en acier inoxydable du réacteur EL4», voir ces comptes rendus.
- [6] McCLUNG, R. W., Development of Non Destructive Testing Techniques for Thin-Wall Beryllium Tubing, ORNL-3670 (1964) 122-8.
- [7] McCLUNG, R.W., Techniques for Low-Voltage Radiography, ORNL-3252 (1962).
- [8] PROT, A. C. et FIGNON, M. G., Radiographies de tubes de béryllium, Note technique CEA, DM-T/320-N (1962) (à paraître).
- [9] CELLER, R., Le problème des fuites en technique du vide, Rapport CEA n° 325 (1954).
- [10] PELCHAT, M. M., Banc de contrôle hélium pour joints Zircaloy-inox vissés brasés, Rapport semestriel CEA ST/TA (1. 3, 1963).
- [11] PELCHAT, M. M., Contrôle de l'étanchéité hélium des jonctions tube de force fond de cuve ELA, Rapport semestriel CEA ST/TA, (1. 3, 1963).
- [12] CHRÉTIEN, N. E., Contrôle d'étanchéité des crayons EL4 par ressuage d'hélium, Note technique CEA ST/ TA, CEA DM-T/441 (1965) (à paraître).
- [13] LANSIART, A., Mesures de spectrométrie gamma sur des échantillons d'uranium naturel et enrichi à 20%, CEA, DE 1284/ED/162.
- [14] BRADLAY, D. E., LEVERENZ, E. G. and McGONNAGLE, W. S., Two Methods for Measuring Total Uranium Content in Co-extruded AlU₃O₈ Reactor Fuel Plates.
- [15] PIGEON, M., Contrôle de l'enrichissement de barreaux d'uranium, CEA DM-T/RT 66 (20 mai 1963).

DISCUSSION

V.V. GORSKY: What frequencies were used in ultrasonic inspection for defect detection and grain-size measurements?

P. THOMÉ: From 3 to 5 MHz

A.A. KISELEV: The paper says that a study was made of an alloy of zirconium with molybdenum and copper for the pressure tubes. What was the composition of this alloy?

P. THOME: Zirconium with 0.5% copper and 0.5% molybdenum.

· · · • . . . •

NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS APPLIED TO MULTI-FINNED SAP TUBING FOR NUCLEAR-FUEL ELEMENTS

S.A. LUND

THE DANISH CENTRAL WELDING INSTITUTION, COPENHAGEN AND P. KNUDSEN

THE DANISH ATOMIC ENERGY COMMISSION, RESEARCH ESTABLISHMENT, RISÖ, DENMARK

Abstract — Résumé — Аннотация — Resumen

NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS APPLIED TO MULTI-FINNED SAP TUBING FOR NUCLEAR-FUEL ELEMENTS. The Danish Atomic Energy Commission has undertaken a design study of an organic-cooled, heavywater-moderated power reactor. The fuel element for the reactor is a 19- rod bundle; the fuel rods contain sintered uranium-dioxide pellets canned in 2-m long, helically-finned tubes of Sintered Aluminium Product (SAP).

A very high quality of the canning tubes is necessary to obtain the optimum heat-transfer conditions and to maintain the integrity of the fuel element during reactor service. Two examples of tube design illustrate the narrow dimensional tolerances.

In order to ensure an adequate quality of the canning tubes, a stringent quality control has been established, to a wide extent based upon non-destructive methods. An account is presented of the non-destructive techniques developed for measuring wall thickness and diameters and for detecting defects.

The complex 24- finned cross-section prevents the application of ultrasonic or eddy-current methods for wall-thickness measurements. Therefore, a special recording beta-gauge has been developed, based upon the attenuation of beta radiation from a Sr⁹⁰ source placed inside the tube.

An ultrasonic immersion resonance method is used for the continuous recording of the wall thickness of the more simple 12-finned tube design. Inner and outer (across fin tips) diameters are continuously recorded by rapid air-gauge systems.

Flaw detection is carried out by the ultrasonic pulse- echo immersion technique and by eddy-current inspection. Transverse cracks can easily be detected by the ultrasonic method whereas inspection for longitudinal flaws has not appeared feasible with this method. Therefore, eddy-current inspection is applied in addition to the ultrasonic testing.

ESSAIS NON DESTRUCTIFS DE GAINES A AILETTES, EN POUDRE D'ALUMINIUM FRITTÉE, POUR ÉLÉ-MENTS COMBUSTIBLES. La Commission de l'énergie atomique danoise a entrepris l'étude d'un réacteur de puissance refroidi par un fluide organique et ralenti à l'eau lourde. L'élément combustible est constitué par un assemblage de 19 barreaux; chaque barreau contient des pastilles de bioxyde d'uranium fritté, dans une gaine de 2[°]m de long en poudre d'aluminium frittée portant des ailettes disposées en configuration hélicoïdale.

Ces gaines doivent répondre à des spécifications très strictes pour que soient réalisées les conditions optimales de transfert de chaleur et que soit maintenue l'intégrité des éléments combustibles aussi longtemps qu'ils restent dans le réacteur. Deux exemples de modèles de gaines montrent à quel point les tolérances dimensionnelles sont faibles.

Afin dé s'assurer que les gaines répondent bien aux spécifications, on procède à un contrôle extrêmement rigoureux, constitué en grande partie par des essais non destructifs. Les auteurs décrivent les méthodes d'essais non destructifs mises au point pour mesurer l'épaisseur de la paroi et les diamètres et pour déceler les défectuosités.

En raison de la géométrie complexe de sa section, le modèle à 24 ailettes ne se prête pas à l'application de méthodes par les ultrasons ou par les courants de Foucault pour mesurer l'épaisseur de la paroi. On a donc mis au point une jauge à rayons bêta spéciale, pourvue d'un dispositif d'enregistrement; elle est fondée sur l'atténuation du rayonnement bêta émis par une source au ⁹⁰Sr placée à l'intérieur de la gaine. Pour le modèle à 12 ailettes, on utilise une méthode de résonance ultrasonore en immersion pour l'enregistrement continu de l'épaisseur de la paroi.

On mesure, en enregistrement continu, les diamètres intérieur et extérieur (au niveau des têtes d'ailettes) avec des appareils comportant une jauge à air rapide.

Pour la détection des défectuosités, on applique la méthode ultrasonore impulsion-écho, en immersion, et la méthode des courants de Foucault. La méthode ultrasonore permet de déceler facilement les fissures transversales, mais elle ne semble pas applicable à la détection des fissures longitudinales; c'est pourquoi on la complète par la méthode des courants de Foucault.

НЕДЕСТРУКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ РЕБРИСТЫХ ТРУБ ИЗ СПЕЧЕННОГО АЛЮМИНИЕНОГО ПОРОШКА ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. Комиссия по атомной энергии Дании предприняла изучение энергетического реактора с органическим теплоносителем и тяжеловодным замедлителем. Топливным элементом для реактора является пучок из 19 стержней; топливный стержень содержит спеченные таблетки из двуокиси урана в двухметровой трубе из спеченного алюминиевого порошка.

Трубы должны быть очень хорошего качества, чтобы обеспечить оптимальные условия переноса тепла и сохранения целостности топливных элементов во время эксплуатации реактора. Два примера относительно конструкции труб свидетельствуют об очень небольших размерных допусках.

Для обеспечения соответствующего качества труб разработан строгий контроль в значительной степени основанный на недеструктивных методах. Приводится описание этих методов, разработанных для измерения толщины стенок и диаметров и для обнаружения дефектов.

Сложное поперечное сечение 24-реберной трубы не позволяет применять ультразвуковые методы или методы вихревых токов для измерения толщины стенок. Поэтому разработан специальный контрольно-измерительный прибор, регистрирующий бета-излучение, основанный на принципе ослабления бета-излучения, получаемого от источника стронция-90, помещенного внутри трубы.

Метод ультразвукового резонанса при погружении применяется для постоянной регистрации толщины стенок более простых конструкций 12-реберных труб.

Внутренний и внешний (между гранями ребер) диаметры постоянно регистрируются быстродействующими системами воздухомеров.

Дефекты обнаруживают с помощью ультразвука методом импульс-эхо и методом вихревых токов. Методом ультразвука можно легко обнаруживать поперечные но не продольные трещины. Поэтому, кроме проверки ультразвуком, применяется испытание вихревыми токами.

METODOS DE ENSAYO NO DESTRUCTIVO APLICADOS A TUBOS DE SAP CON ALETAS MULTIPLES DESTINADOS A ELEMENTOS COMBUSTIBLES. La Comisión de Energía Atómica de Dinamarca ha emprendido el estudio de un reactor de potencia con refrigerante orgánico y moderador de agua pesada. Los correspondientes elementos combustibles consisten en haces de 19 barras formadas por pastillas de dióxido de uranio sinterizado, encerradas en tubos de producto de aluminio sinterizado (SAP), de 2 m de longitud, provistos de aletas helicoidales.

Para obtener condiciones óptimas de transmisión de calor y mantener la integridad del elemento combustible durante el funcionamiento del reactor, es necesario contar con tubos de muy alta calidad. Se citan dos ejemplos que ponen de manifiesto las estrechas tolerancias dimensionales adoptadas.

Para asegurar una calidad adecuada de los tubos, se estableció un control de calidad muy estricto, basado en gran medida en la aplicación de métodos no destructivos. Se describen en esta memoria las técnicas desarrolladas para medir el espesor de pared y los diámetros, y para descubrirs defectos.

La compleja sección transversal, con 24 aletas, impide aplicar métodos ultrasónicos o de corrientes de Foucault para medir el espesor de la pared. Por consiguiente, se desarrolló un calibre registrador de rayos beta, cuyo funcionamiento se basa en la atenuación sufrida por la radiación beta proveniente de una fuente de ⁹⁰Sr colocada en el interior del tubo.

Para el registro continuo del espesor de la pared del tubo con sección transversal más simple, de 12 aletas, se utiliza un método ultrasónico de resonancia por inmersión.

Los diámetros interno y externo (entre puntos de aletas) se registran de manera continua mediante calibres neumáticos rápidos.

Las fallas se detectan mediante la técnica de eco de impulsos ultrasónicos, y examinando los tubos con corrientes de Foucault. El método ultrasónico permite descubrir fácilmente las fisuras transversales, pero hasta ahora ha sido imposible utilizarlo para la detección de defectos longitudinales. Por consiguiente, además del ensayo ultrasónico, se aplica el examen con corrientes de Foucault.

1. INTRODUCTION

The Danish Atomic Energy Commission has undertaken a design study of an organic-cooled, heavy-water-moderated power reactor, fuelled with slightly enriched uranium dioxide [1]. Sintered Aluminium Products (SAP)* have been selected as canning material [2] owing to their advantageous properties under the operating conditions of this reactor design (maximum canning temperature 413°C, increasing at hot spots to 480°C). The following properties are of particular importance in this respect:

- (a) Low neutron absorption cross-section.
- (b) Good mechanical strength and structural stability [3,4].
- (c) Acceptable compatibility with fuel [5] and coolant [6].
- (d) Resistance to irradiation damage [3].

The fuel element for the reactor is a 19-rod bundle; each fuel rod contains sintered UO_2 pellets canned in a 2-m long, helically finned SAP tube.

Two examples of canning-tube design are shown in Fig. 1. The feasibility of manufacturing tubing with such narrow tolerances is checked on pilotproduction quantities. The tubes must be of a very high quality to maintain the integrity of the fuel elements during reactor service. Therefore, a stringent quality control has been established, to a large extent based upon non-destructive methods. Several aspects of this inspection have required considerable development work on account of the rather intricate crosssection of the tube designs. This applies particularly to wall-thickness measurement and defect inspection.

The finned tubes shown in Fig. 1 are manufactured by extrusion. Experience has shown that even when very precisely machined tools are used, the dimensions may vary along the tube. During extrusion the mandrel, which forms the bore in the tube may oscillate from side to side so as to give an eccentrically placed bore, i.e. the wall thickness will vary. Furthermore, even in perfectly circular tubes the internal diameter may vary in a "pulsating" way along the tube, and the tubes are often slightly conical. A dimensional check carried out at the tube ends will therefore not be sufficient to ensure dimensions within the specified tolerances. The fin helix can be obtained by twisting after extrusion. Internal stresses thus generated may lead to an oval cross-section of the tube, especially in places with varying wall thickness.

Unless a manufacturing technique can be developed by which an extremely constant production quality is obtained, it will thus be necessary to carry out a practically 100% inspection of the two dimensions: wall thickness and internal diameter. Suitable inspection methods must therefore provide for

* The sintered aluminium products examined in this work have been manufactured by Swiss Aluminium under the name of SAP. The designations SAP 930, SAP 895 and SAP 865 used throughout this paper indicate materials with nominal contents of about 7, 11 and 14% by weight of aluminium oxide dispersed in aluminium. The properties of these materials are comparable for equal oxide contents to those of sintered-aluminium/aluminium-oxide materials manufactured by other companies, for example Montecatini in Italy and ALCOA in the United States of America.



Cross-section of SAP tubes.

(a) 24-finned tube. (b) 12-finned tube,

continuous measurement of these dimensions. For practical reasons the measuring results must be recorded automatically and in a way which allows a simple, direct evaluation of the quality.

This report deals with the requirements leading to the development of a special beta gauge for wall-thickness measurement on the 24-finned tubes. In addition, the ultrasonic procedure for similar measurements on the 12finned tubes is described. Further, reference is made to rapid air-gauge systems developed for the measurement of inner and outer diameters. Finally, an account is given of the ultrasonic and eddy-current techniques which have been established for the detection of defects.

A common feature of all the inspection techniques developed is their applicability to continuous, recording measurements.

2. SELECTION OF METHODS FOR WALL-THICKNESS MEASUREMENT

The wall thickness between the cooling fins is specified with a tolerance of $\pm 10\%$ for the 24-finned tubes and $\pm 6\%$ for the 12-finned tubes. Measuring accuracies of at least $\pm 1\%$ and $\pm 0.6\%$ respectively will therefore be required, i.e. an accuracy of approximately ± 4 to $6 \mu m$.

In principle the ultrasonic immersion resonance method can be used for wall-thickness measurement on 24-finned as well as on 12-finned tubes. In practice, however, it was found very difficult to avoid spurious indications in the case of the 24-finned tubes because of the relatively high fins and the



Fig.2

Beta gauge.

(a) Measuring principle, schematic. (b) Decay scheme of Sr^{90} . (c) Measuring head.

narrow space between them. Therefore, the recording system did not work satisfactorily.

For these 24-finned tubes an experimental beta gauge was developed.

3. BETA GAUGE

3.1. Principle

The wall thickness was determined by means of a set-up as shown schematically in Fig. 2. In principle it consists of a beta source placed in a well-defined position inside the tube and a scintillation detector with a collimating slot placed outside the tube in a fixed position relative to the source holder in such a way that the beta particles must pass through the tube wall to reach the scintillator. By measuring the penetrating radiation the wall thickness can be determined.

Originally the idea was to rotate the tube whilst moving it along the detector so as to scan it helically across the fins. This could give a very simple measuring system whereby the wall-thicknesses could be read as the maximum count rates.

A few experiments showed, however, that with the relatively small source strength available the time constant for the detector would be too high to give a reasonable measuring time. The experimental measurements were therefore carried out along the fin direction by guiding the tube with suitable pins.

3.2. Beta source

SAP materials with a thickness t = 0.65 mm have the following characteristics:

	Density (g/cm ³)	Absorber thickness (mg/cm ²)
SAP 865	2.80	182
SAP 895	2.75	179
SAP 930	2.73	177

It is seen that a variation in normal wall thickness of $\pm 10\%$ corresponds to a variation in absorber thickness from 160 to 195 mg/cm²; thus a beta source having a half-thickness within this range will be suitable.

Strontium-90 consists of $Sr^{90} + Y^{90}$ in radioactive equilibrium (see Fig.2). The half thickness of this source is 160 mg SAP/cm², which corresponds approximately to the wall thicknesses in question:

Maximum penetration for 2.26 MeV: 1100 mg SAP/cm²

Maximum penetration for 0.54 MeV: 170 mg SAP/cm².

Beta particles with a maximum energy of 0.54 MeV will have no influence on the measurements as they are also absorbed by the source capsule, the air between source and detector and the light shield in the detector.

The decay time for Sr^{90} is 28 yr, and decay is thus of no practical importance for these measurements.

 Sr^{90} is a pure beta emitter, but the encapsulating materials as well-as the SAP tube etc., generate a certain amount of X-rays which are so hard that they are not attenuated significantly even for relatively big variations in the thickness of the SAP wall. These materials do, however, cause a constant, undesired increase in pulse rate.

3.3. Detector

The scintillator itself is a plastic scintillator (Nuclear Enterprise, type NE-102) with a length in the direction of radiation of 8 mm. For optimum efficiency it is mounted between two reflecting prisms optically coupled to the photomultiplier tube with silicon oil. A collimator is mounted in front of the scintillator. It has a narrow slit to ensure that only radiation from the area between the fins is received. The pulses from the photomultiplier are fed to an integrating count-rate meter connected to a pen recorder.

3.4. Scanning device

The gauge head is shown in detail in Fig.2. It consists of a block with two ring-shaped nylon supports for the SAP tubes. The detector and collimator are mounted in such a way that the slit can be adjusted in a horizontal direction perpendicular to the tube axis. Furthermore, the collimator slit can be rotated about the axis of the detector and can thus be adjusted in the direction of the fins.

The position of the fin space relative to the collimator slit can be fixed by means of two opposite spring-loaded nylon guiding pins mounted in such a way that the tube position can be adjusted by rotating the guiding pins about the axis of the tube.

The whole measuring head is mounted on gimbals so that the SAP tube cannot be jammed in the nylon supports. The 10-mCi Sr⁹⁰ source is mounted in a holder which is connected via a cardan joint to a 2.2-m-long aluminium tube mounted on the scanning bench. The scanning bench allows for axial movement of the SAP tubes with or without simultaneous rotation of the tube.

In order to obtain a high count rate, the opening of the collimator was chosen to be as wide as possible, but even with a width of 0.35 mm the guidance of the tube relative to the collimator is quite critical, which means that the clearance between the supporting rings and the tube, and between the source holder and the tube, must be kept at an absolute minimum. Only tubes with diameters within the specified tolerances can therefore be measured.

3.5. Calibration

A calibration curve is made experimentally by plotting thickness <u>versus</u> count rate for a number of measurements; the wall thicknesses are determined by microscopic measurement on diamond-polished cross-sections. The calibration curve is shown in Fig. 3.

3.6. Accuracy

The accuracy of the measurements depends upon the following parameters:

(a) Statistical error of measured pulse rate;

(b) Error caused by dynamic measurement;

(c) Error due to temperature drift of detector and count-rate meter. The measurements were made with a disc-shaped Sr^{90} source approximately 1 mm in diameter; although this source was not ideal in dimensions, shape and encapsulation, an accuracy of $\pm 1\%$ at a measuring speed of 20 mm/s could be obtained. For a 24-finned tube this corresponds to a measuring time of 50 min for a 2.2-m-long tube.

Provided the problems concerning the stability of the scintillation detector can be solved, an increase in accuracy can be expected. Compared with the ultrasonic resonance method, however, the beta-gauge method must be considered relatively slow.



(b) Beta-gauge record of wall-thickness variation.

4. ULTRASONIC WALL-THICKNESS MEASUREMENT

The wall thickness of 12-finned tubes is measured ultrasonically by the immersion resonance method [7, 8] with special high-speed equipment (Branson Vidigage type BH).

The measuring equipment is shown schematically in Fig.4. It consists of a focused probe, a collimator and a suitable water-supply system which ensures that no air bubbles are present in the area measured or between this area and the probe.

To obtain a reasonably high measuring speed in a helical scan, the sweep frequency of the oscillator has been increased from 50 - 60 cps to 300 cps, i.e. the thickness is measured 300 times per second. A monitor provides a signal for recording the indicated thickness.

The wall thickness of smooth tubes is normally measured by a helical scan. In the case of finned tubes, spurious indications occur when a fin enters the sound beam, in which case of course the recording fails. To overcome this difficulty, the signal is short-circuited electronically by a gated system as soon as more than one signal occurs within the tolerance limits.

The first calibration of the equipment is made by measuring SAP tubes and afterwards determining their wall thickness by microscopic measurements on diamond-polished cross-sections. The checking and possible adjustment of calibration during inspection are made by means of two calibrated oscillators which provide electronic signals corresponding to the upper and lower tolerance limits. Hence the calibration can be checked at any time even with a tube of unknown thickness mounted in the measuring head.

The measuring equipment is shown in Fig.4 together with an example of a recording. The measuring speed obtainable with this equipment is approximately 1 min for a 2.2-m-long tube.

NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS



Fig.4

Ultrasonic wall-thickness measurement.

(a) Immersion resonance method, schematic.

- (b) Measuring equipment and scanning bench.
- (c) Record of wall-thickness measurement on 12-finned tube.

5. DIAMETER MEASUREMENTS

5.1. Internal diameter

The internal diameter is specified with a tolerance of ± 0.04 mm. A suitable inspection method should therefore offer a measuring accuracy of ± 0.004 mm or better.

A plug gauge with the smallest acceptable diameter can be used for sorting out tubes with too small an internal diameter. It is, however, not possible in a similar simple way to inspect an internal diameter which is too big. Therefore the simple and reliable air-gauge method [9-11] was selected for internal-diameter measurements. The principle of this pneumatic measuring system is shown schematically in Fig. 5.

The valve D determines the amount of air being fed to the measuring head, and the air pressure just before the nozzles is determined by the size of the gaps s and s', a big gap causing a low and a small gap a high back pressure.



Fig. 5

Air-gauge measurement of internal diameter.

(a) Measuring principle, schematic. (b) Improved system, schematic. (c) Typical air-gauge records.

Within certain limits the back pressure is dependent only on s+s', i.e. the measured pressure is independent of whether the measuring head is placed concentrically in the tube or not.

By means of another value E with connection to the atmosphere the back pressure can be raised or lowered. An opening of this value will have the same effect as an increase of the total gap distance s+s'. The first set-up was based on a conventional air gauge (Mercer Back Pressure Gauge), and the recorder used was a mechanical manograph of the Bourdon type. The tubes were scanned helically in the scanning bench. The measuring results obtained in this way were excellent but the system worked rather slowly because of relatively large air volume in the manograph and tubes etc.

A more rapid air-gauge system was therefore developed (see Fig. 5). A miniature version of the two-valve system is now placed just before the outlet nozzles in the measuring head. The back pressure is measured by means of a strain-gauge pressure transducer with no dead space, mounted outside the SAP tube and connected to the measuring head through a capillary tube.

The recording is made by an electric pen recorder. Like the tube movement, the paper movement is controlled by synchronous motors so that the relation between tube and paper speed is constant.

With this system the scanning speed has been increased from 2.5 to 25 mm/s. The measuring time for a 2.2-m tube has thereby been reduced from 45 to 5 min per tube.

The tube between the pressure transducer and the probe head must have dimensions which provide a compromise between the requirements of a small dead volume and a large flow cross-section. Because of this tube the system still has a considerable time constant, and a high-speed air-gauge system has therefore been developed for production inspection.

In this system the pressure is measured by means of a miniature pressure transducer of the semi-conductor type, placed very close to the outlet nozzles of the measuring head. The total dead volume is thus reduced to the absolute minimum, and hence the response time of the system is extremely short.

Typical air-gauge diagrams are shown in Fig. 5.

5.2. Outer diameter (fin-tip to fin-tip diameter)

The outer diameter of 24- and 12-finned tubes is specified with a tolerance of ± 0.1 and ± 0.05 mm respectively (see Fig.1). While it is simple, by means of a tolerance ring, to check the maximum acceptable diameter, it is not possible by similar simple means to control the minimum acceptable diameter.

An experimental set-up for continuous measurement and recording of the outside diameter of 24-finned tubes has therefore been developed. The fin tips are helically scanned by means of a special air-gauge device. The principle of the measuring method is illustrated in Fig.6.

The design of the suspension system ensures that no moment forces, which might cause a measuring error, can be transferred from the tube to the measuring arms. The connection between the two measuring arms consists of two short blade springs, being thus absolutely free of play and friction.

• The measuring device and typical records are shown in Fig.6.



Measurement of outer diameter (fin-tip to fin-tip).

(a) Measuring principle, schematic. (b) Measuring device. (c) Typical records.

6. DEFECT DETECTION

Defects observed in SAP tubing are usually in one of the following categories:

- (a) Voids and surface defects (flaws, scratches etc.) due to incorrect extrusion and handling procedures;
- (b) Inclusions originating from impurities in the powder material;
- (c) Inhomogeneities ("stringers") in the Al₂O₃ distribution caused by imperfect powder preparation.

The amount of these defects present in the SAP tubing should be kept at a minimum to obtain optimum mechanical properties and corrosion resistance.

Methods of defect detection are still in the course of development. Flaw detection is carried out by the ultrasonic pulse-echo immersion technique and by eddy-current inspection. Transverse cracks can easily be detected by the ultrasonic method, whereas inspection for longitudinal flaws has not appeared feasible by this method. Therefore eddy-current inspection is applied in addition to the ultrasonic testing.

7. CONCLUSION

Procedures have been established for non-destructive dimensional measurements on multi-finned SAP tubing for nuclear-fuel elements.

The wall thickness is measured by a beta gauge or an ultrasonic immersion resonance method. The air-gauge principle is utilized in the measurement of inner and outer diameters. Methods of defect detection are being developed on the basis of the ultrasonic pulse-echo and eddycurrent methods. It is a common characteristic of these inspection techniques that they are applicable to continuous recording measurements.

The development work is carried as far as required for the evaluation of pilot-production quantities. Further development along the lines described in this paper are expected to result in procedures applicable to massproduction inspection.

ACKNOWLEDGEMENT

The assistance of the Danish Isotope Centre, Copenhagen, in the development of the beta gauge is gratefully acknowledged.

REFERENCES

- MØLLER-MADSEN, M., LIST, F. and ELMING, J., Design Problems in the D₂O-Moderated, Organic-Cooled Reactor Concept DOR, 3rd UN Int. Conf PUAE, A/CONF. 28/P/777, Geneva (1964).
- [2] HANSEN, N., ADOLPH, E. and CHRISTENSEN, J., Sintered Aluminium Powder for Reactor Applications. Risö Report No. 13 (1960).
- [3] HANSEN, N., KNUDSEN, P., WINTHER, A.C. and ADOLPH, E., Sintered Aluminium Products for Organic Reactor Application. 3rd UN Int. Conf. PUAE, A/CONF.28/P/421, Geneva (1964).
- [4] HANSEN, N. and ADOLPH, E., The Effect of Heat Treatment on the Structural Stability of Sintered Aluminium Products. Risö Report No. 25 (1961).
- [5] LAURITZEN, T. and KNUDSEN, P. (to be published in J. nucl. Mat.).
- [6] SCHLEICHER, H.W., Corrosion Studies in Organic Coolants for Nuclear Reactors, EUR 379. e (1963).
- [7] HARRIS, R.V., Ultrasonic News, Spring (1962) 6-11.
- [8] LEIJSEN, W., Materialprüfung 4 (1962) 407-411.
- [9] MIERZEJEWSKI, J., Feingerätetechnik 4 (1955) 558-562.

[10] GRANEEK, M. and EVANS, J.C., Machinery <u>79</u> (1950) 33-37.
[11] GRANEEK, M. and WUNSCH, H.L., Machinery 81 (1952) 701-706.

DISCUSSION

P. NEIDER: What was the size of the collimator slit, and what was the activity of the Sr^{90} source?

S.A. LUND: The collimator slit has a width of 0.35 mm, a length of 12 mm in the direction of the radiation and a length of 8 mm in the direction of the fins. It is adjusted parallel to the fins.

The activity of the Sr^{30} source was 10 mCi, but the shape was not ideal for this application and the measuring speed could be improved considerably with a more suitable source shape and strength.

V. V. GORSKY: How does ellipticity of the tube affect the accuracy of measurement of the internal diameter of the tube?

S.A. LUND: When the diameter is within the acceptable tolerance limits $(\pm 40 \ \mu m)$, ellipticity of the tube has no practical influence on the accuracy.

During measurement, the tube is rotated and the diameter is measured and recorded continuously during rotation. This means that the maximum and minimum diameters in an elliptical cross-section are measured twice per revolution. For a given cross-section the ellipticity as well as the maximum and minimum diameters can be read directly from the recorded measuring results.

P. de MEESTER: You mentioned that with the beta-gauge device the measured tubes should have inner and outer diameters within the tolerances of the specification. Does this mean that the beta test is to be regarded as a quality acceptance control or is it rather a precise measurement for post-irradiation evaluation?

S.A. LUND: It is a quality acceptance control. The wall-thickness measurement is carried out after the air-gauge measurement of the internal and outer diameters. The wall thickness is measured only on those tubes which have been accepted at the diameter control.

D. WORLTON: What type of detector is used for the beta thickness-gauge?

S.A. LUND: The scintillator is of plastic (Nuclear Enterprises (G.B.) Ltd., Type NE 102). It is 1 mm thick, 8 mm wide, and the length in the direction of the radiation is 8 mm.

APPLICATION DES DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ESSAIS NON DESTRUCTIFS AUX ÉLÉMENTS COMBUSTIBLES DU TYPE ORGEL

P. BONNET ET J. JANSEN EURATOM, CENTRE COMMUN DE RECHERCHES, ISPRA, ITALIE

Abstract — Résumé — Аннотация — Resumen

THE APPLICATION OF VARIOUS NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS TO FUEL ELEMENTS OF THE ORGEL TYPE. The paper describes the various methods employed to detect flaws (dimensional or structural) in fuel-element canning tubes. The authors also describe the final tests on complete fuel elements, in particular radiography of welds and leak-tightness tests. This subject has already been discussed to some extent,

The dimensional characteristics of smooth SAP (sintered aluminium powder) canning tubes have been fairly extensively investigated, and in particular:

1. The internal and external diameters have been measured using pneumatic pick-ups and recording the result;

2. The thicknesses have been measured using either ultrasonic resonance methods or γ -rays (a Euratom-Istituto Sperimentale Metalli Leggeri contract);

Checking the deflection;

4. Tests of finned tubes.

Work has also been carried out on detecting flaws in smooth canning tubes, and rejection criteria have been adopted depending on the prospective use of the tubes.

(a) The making of artificial flaws corresponding to the harmfulness of actual flaws in the SAP is described. This study revealed high sensitivity to flaws of the longitudinal type generally caused by large inclusions during processing.

(b) Ultrasonic tests.

Longitudinal flaws: Comparison between the method with two pick-ups and that with one shows the limitations of these two methods.

Transverse flaws: The single pick-up method used in investigating these is briefly described.

Mechanical drive: A laboratory-type mechanical test bench for investigating test criteria and a special semi-industrial bench for the continuous inspection of the tubes and the recording of flaws are mentioned. The difficulties encountered and the steps taken to prevent them are described.

(c) Radiographic tests.

This method will be discussed in a special paper; here we simply indicate the results obtained on pressure tubes and canning tubes.

(d) Various tests.

The final tests on complete fuel elements can be summed up in two sections:

Helium leak-tests developed by SOGEV. There is a device making it possible to examine four or six fuel elements simultaneously, or two or three separately.

Standard radiographic tests. Particular stress is laid on the study of welds, and the limits of the experimental conditions in order to obtain good definition are given.

In conclusion, the authors present a plan for a semi- industrial inspection system, describing the various possibilities for treatment, and try to define a general policy of non-destructive tests applied to fuel elements.

APPLICATION DES DIFFERENTES METHODES D'ESSAIS NON DESTRUCTIFS AUX ELEMENTS COM-BUSTIBLES DU TYPE ORGEL. Le mémoire présente les différentes méthodes employées pour la détection des défauts dans les tubes de gaine des éléments combustibles (défauts de type dimensionnel ou défauts structuraux). Les auteurs évoquent également les tests finaux sur éléments combustibles complets, en particulier: radiographie des soudures et tests d'étanchéité. Ce sujet a déjà été partiellement traité.

La recherche des caractéristiques dimensionnelles sur tube de gaine lisse en poudre d'aluminium frittée (SAP) a fait l'objet de recherches assez poussées. En particulier:

1. Mesures des diamètres internes et externes par utilisation de capteurs pneumatiques et enregistrement des résultats;

 Mesures des épaisseurs par utilisation, soit des ultrasons en méthode de résonance, soit des rayons γ (contrat EURATOM - Istituto Sperimentale Metalli Leggeri);

3. Contrôle de la flèche;

4. Tests sur tubes à ailettes.

La détection des défauts sur tube de gaine lisse a également fait l'objet de travaux et un critère de rejet a été adopté suivant l'utilisation future des tubes de gaines.

a) La création de défauts artificiels en fonction de la nocivité des défauts réels dans la poudre d'aluminium frittée est expliquée dans le mémoire. Cette étude a montré, en effet, une grande sensibilité aux défauts du type longitudinal créés généralement lors de la transformation par de grosses inclusions.

b) Tests par ultrasons.

<u>Défauts longitudinaux</u>: Une comparaison entre la méthode à deux capteurs et la méthode à un capteur montre quelles sont les limites d'utilisation de ces deux méthodes.

Défauts transversaux: La méthode à un capteur appliquée à cette recherche fait l'objet d'une brève description.

<u>Entraînement mécanique</u>: Le mémoire fait état d'un banc mécanique, type laboratoire, pour la recherche des crittères d'essais et d'un banc de passage des tubes, de type semi-industriel, pour l'examen en continu avec enregistrement des défauts. Les difficultés rencontrées et les moyens mis en œuvre pour y remédier sont évoqués.

c) Tests par radiographie.

Cette méthode fera l'objet d'un mémoire spécial; seuls sont indiqués les résultats obtenus sur tubes de force ou sur tubes de gaines.

d) Test divers

Les test finaux sur éléments combustibles complets peuvent se résumer en deux parties.

Tests d'étanchéité au moyen du test à l'hélium développé par la SOGEV. Un dispositif permet d'examiner simultanément 4 ou 6 éléments combustibles ou séparément 2 ou 3.

Tests classiques de radiographie; l'accent est mis plus particulièrement sur l'étude des soudures; on donne la marge des conditions expérimentales pour obtenir une bonne définition.

En conclusion, les auteurs présentent un projet de chaîne de contrôle semi-industrielle avec les différentes possibilités de traitements et essaient de dégager une certaine philosophie des tests non destructifs appliqués aux éléments combustibles.

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ НЕДЕСТРУКТИВНЫХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ К ТОП-ЛИВНЫМ ЭЛЕМЕНТАМ ТИПА "ОРГЕЛЬ". Излагаются различные методы обнаружения дефектов в оболочках топливных элементов (дефекты в размерах или структуре). Говорится также об окончательных испытаниях топливных элементов, в частности о радиографии сварки и об испытаниях на герметичность. Эта тема уже затрагивалась частично.

Изучение размерных характеристик торцевого среза оболочки из спеченного алюминиевого порошка уже являлось темой довольно развернутых исследований.

В частности изучались следующие вопросы:

1. Измерения внутренних и внешних диаметров на основе применения пневматических ловушек и регистрации результатов.

 Измерения толщины на основе использования либо ультразвука по методу резонанса, либо лучей (контракт между Евратомом и Экспериментальным институтом легкой металлургии).

3. Контроль по стреле прогиба.

4. Испытания на ребристых трубах.

Обнаружение дефектов в оболочках также было темой научной работы, и критерий непригодности был принят с учетом будущего применения оболочек. Дается описание следующих испытаний:

а. Создание искусственных трещин и выявление зависимости их вреда по сравнению с действительными трещинами в спеченном алюминиевом порошке. Это исследование в действительности показало большую чувствительность к продольным трещинам, возникающим обычно в период превращений, вызванных крупными вкраплениями.

б. Испытания ультразвуком.

Продольные трещины. Сравнение методов с двумя и с одной ловушкой свидетельствует о пределах использования обоих методов.
Поперечные трещины. Дается краткое описание метода с одной ловушкой, примененного в данном исследовании.

Механическая подготовка. Говорится о механическом стенде лабораторного типа для изучения испытательных критериев и о полупромышленном стенде прохождения труб для постоянного изучения с регистрацией дефектов. Говорится о трудностях и о средствах для их преодоления.

в. Испытания радиографией. Этот метод описан в специальном докладе, здесь говорится лишь о результатах, полученных на силовых трубках или на оболочках.

г. Другие испытания. Окончательные испытания топливных элементов могут быть представлены в двух группах:

1) испытания на герметичность по разработанному Согевым методу испытания с гелием; устройство позволяет изучать одновременно 4 или 6 элементов либо раздельно 2 или 3 топливных элемента;

2) обычные опыты с радиографией; отдельно внимание уделяется изучению сварки и

даются пределы экспериментальных условий для получения хорошего определения. В заключение предлагается проект полупромышленной контрольной схемы с различными возможностями вероятных обработок и сделаны определенные выводы.

APLICACION DE DISTINTOS METODOS DE ENSAYO NO DESTRUCTIVO A LOS ELEMENTOS COMBUS-TIBLES DE TIPO ORGEL. La memoria presenta los distintos métodos empleados para detección de fallas (de tipo dimensional o estructural) en vainas de elementos combustibles. Los autores describen, asimismo, los ensayos finales con elementos combustibles completos, en particular radiografía de las soldaduras y pruebas de estanqueidad. Este tema se ha tratado ya en forma parcial.

El estudio de las características dimensionales de las vainas lisas de SAP (producto de aluminio sinterizado) ha sido objeto de trabajos bastante avanzados. La memoria examina en particular los siguientes temas:

1. Medición de diámetros internos y externos empleando captadores neumáticos, y registro de los resultados.

2. Medición de espesores empleando métodos de resonancia ultrasónica o bien rayos y (contrato Euratom-Istituto Sperimentale Metalli Leggeri).

3. Control de la flecha.

4. Ensayos con tubos de aletas.

La detección de fallas en vainas lisas ha sido también objeto de trabajos y se ha adoptado un criterio de rechazo según la finalidad a que las vainas se destinan.

a) Se estudiará la creación de defectos artificiales, en función de la nocividad de los defectos reales en el SAP. Los estudios preliminares han puesto de manifiesto una gran sensibilidad a los defectos longitudinales, creados generalmente al producirse la transformación, y debidos a inclusiones de gran tamaño.

b) Ensayos con métodos ultrasónicos.

Defectos longitudinales: Se compara el método de 2 captadores con el de un solo captador y se ponen · de manifiesto las limitaciones inherentes a la utilización de cada uno de ellos.

Defectos transversales: Se presenta una breve descripción del método de captador único aplicado a este problema.

<u>Arrastre mecánico</u>: Se describe un banco mecánico tipo laboratorio para estudiar los criterios de ensayo y un banco de tipo semi- industrial para pasaje de los tubos e inspección continua de los mismos, con registro de los defectos. Se explican las dificultades con que se tropezó en su construcción y puesta a punto, y los medios empleados para superarlas.

c) Ensayos radiográficos.

Este método será objeto de una memoria especial; se señalan aquí solamente los resultados obtenidos en tubos de fuerza o vainas.

d) Ensayos diversos.

Los ensayos finales con elementos combustibles completos pueden clasificarse en dos categorías: Bruebas de estanqueidad empleando helio, desarrolladas por la SOGEV. Un dispositivo permite inspeccionar al mismo tiempo 4 δ 6 elementos combustibles, o bien 2 δ 3 por separado.

Ensayos radiográficos clásicos. Se hace hincapié en el estudio de las soldaduras y se establecen las condiciones experimentales para obtener una definición satisfactoría.

Para concluir, los autores presentan un proyecto de cadena de control semi-industrial, con las diferentes posibilidades de tratamiento existentes y formulan observaciones de validez general sobre los ensayos no destructivos aplicados e elementos combustibles.

I. GÉNÉRALITÉS

1. Introduction

Les essais non destructifs doivent permettre de connaître la pièce testée de façon suffisamment précise pour en expliquer les défaillances éventuelles en cours d'utilisation et pour contribuer à en améliorer la fabrication.

Un des problèmes principaux de sécurité dans le canal ORGEL ou le canal ESSOR est constitué par la santé des tubes de force et des tubes de gainage et l'étanchéité des éléments combustibles. En effet, les ruptures de gaine en réacteur peuvent avoir des causes diverses, mais se localisent le plus souvent à l'endroit du défaut. Une sensibilité et une sécurité accrues dans la détection et la localisation des défauts sont donc indispensables. Ceci ne peut s'obtenir que par l'emploi conjugué et comparé de plusieurs techniques.

Des méthodes de détection classiques ont donc été développées en laboratoire, en vue de leur application spécifique au contrôle de tubes. Leur efficacité dans divers domaines a été comparée expérimentalement. De plus, la nécessité d'un contrôle a conduit à l'application, à une échelle semiindustrielle, des méthodes développées en laboratoire. Les résultats de tels contrôles doivent être conservés sous forme d'archives aisément accessibles et transportables. De plus ces information, outre leur utilité immédiate, peuvent être soumises à des analyses et des traitements en ordinateur apportant des conclusions précieuses pour l'amélioration de la fabrication et la prédiction du comportement futur en cours d'utilisation.

2. Application pratique

2.1. Buts

Dans notre cas, les essais non destructifs sont effectués dans le but de constater des écarts vis-à-vis d'une qualité soit idéalement parfaite, soit standard, fixée par des normes ou des cahiers des charges. Nous appelons ces écarts « défectuosités », même s'il n'est pas prouvé qu'ils soient nuisibles. Ces défectuosités affectent diverses formes: défauts, soit discontinuités de la matière et présence de corps étrangers, soit variations dimensionnelles. Il s'agira non seulement de détecter les défauts, mais aussi de les localiser et d'évaluer leur importance.

Les essais portent actuellement sur des tubes de SAP (Sintered Aluminium Powder) tant de gainage que de force (High Pressure Tubes, HPT). Les tubes de gaine lisses ont des longueurs allant jusqu'à 3 m. Le diamètre interne varie entre 8 mm et 36 mm. L'épaisseur se situe entre 0,4 et 1 mm. Les tubes de gaine à ailettes ont des coefficients d'ailetage allant de 1,2 à 2 et sont vrillés à un pas de 1200 mm.

Les méthodes relatives aux tubes de gaines sont élaborées et appliquées au service Métallurgie et Céramique. Pour les tubes de force les méthodes développées par ce service sont mises en œuvre par le service Technologie (Ispra).

2.2. Conditions générales requises

De manière générale, l'essai non destructif répond au schéma suivant. Une onde de nature mécanique ou électromagnétique: ultrasons, courants de Foucault, rayons X, rayons lumineux, etc., est appliquée à l'échantillon qui y répond selon diverses conditions dont certaines lui sont propres et intéressent donc l'utilisateur. Ces ondes sont engendrées et ensuite rendues visibles et mesurables par des appareillages comportant le plus souvent une partie électronique et une partie «traductrice» - sonde piézo-électrique, tube Coolidge, etc. Des dispositifs d'exploration mécanique assurent l'injection de la grandeur dans des conditions bien définies.

Afin que les résultats soient reproductibles, les conditions suivantes doivent être rassemblées:

- La partie électronique doit être facilement contrôlable par des étalonnages simples.
- La partie purement mécanique doit assurer un positionnement précis du «traducteur» vis-à-vis de la pièce et de plus permettre une exploration systématique et totale de celle-ci.
- L'ensemble doit isoler convenablement le paramètre intéressant c'està-dire le plus souvent le défaut - des autres paramètres affectant la réponse de la pièce (qui peuvent être déterminés par ailleurs).

2.3. Conditions de pré-étalonnage

La sensibilité et d'autres caractéristiques d'un appareillage peuvent être déterminées au moyen d'échantillons types qui leur sont soumis. Pour les ultrasons, nous connaissons par exemple les blocs Alcoa et le bloc RTD; pour la radiographie, les divers indicateurs de qualité d'image et les pénétramètres ou blocs à gradins.

Dans la plupart des cas, le seul procédé applicable consiste néanmoins à créer dans une pièce similaire à celle à contrôler des défauts artificiels de même type et, si possible, de grandeur voisine de ceux qui doivent être détectés. L'étalonnage par défauts naturels est également pratique. Ce dernier présente l'avantage d'un meilleur réalisme, mais ne se prête pas à une standardisation et à une comparaison aussi rigoureuse des diverses méthodes.

Dans l'état actuel de la technique il est d'ailleurs difficile d'établir une relation certaine entre les indications d'un appareil et l'importance des défauts correspondants. On renonce donc à mesurer le défaut et se contente d'en déterminer l'ordre de grandeur.

2.4. Conditions géométriques et mécaniques

14

Pour plus de clarté, ces questions seront traitées dans les paragraphes relatifs à chaque technique.

3. Moyens d'investigation

Parmi les nombreux types d'essais non destructifs connus actuellement, certains peuvent être envisagés pour le contrôle de certaines caractéristiques des tubes de SAP:

- l'examen visuel simple ou aidé par binoculaire ou endoscope,
- les liquides pénétrants (LP),
- la réplique totale en latex (Alfille),
- la métrologie dimensionnelle,
- la mesure locale de résistivité électrique (σ),
- les isotopes bêta (β),
- les rayons X,
- les courants de Foucault (CF),
- les ultrasons (US).

Les possibilités qu'offrent certaines de ces méthodes sont discutées plus loin.

4. Les défauts

Compte tenu de leur possibilité de détection variable selon les méthodes, les défauts rencontrés jusqu'à présent ont le plus souvent pu être rangés dans une des catégories suivantes:

4.1. Défauts superficiels

- sur la surface extérieure, dits défauts OD (outer diameter),
- sur la surface intérieure, dits ID (internal diameter),
- transversaux, T,
- longitudinaux, L,
- piqûres, P.

4.2. Défauts internes

- vides, V,
- inclusions, I.

4.3. Effet nuisible des défauts

Des études entreprises (tests d'éclatement) sur tubes de gaine en SAP [1] montrent une grande sensibilité du SAP aux défauts longitudinaux. Comme le montrent les figures 1 et 2, des défauts transversaux affectant 75% de l'épaisseur (0, 7 mm) sont moins nuisibles que des défauts longitudinaux, l'un de 15 μ m (externe, fig. 1) l'autre de 18 μ m (interne, fig. 2). Nous remarquons certes que les fissures prennent naissance au droit des entailles, mais elles se propagent longitudinalement au niveau du défaut même s'il ne se trouve pas dans la partie la plus entaillée.

Dans les tubes à ailettes, la détection des défauts longitudinaux est encore plus nécessaire. Généralement les éclatements se font au pied des ailettes d'espacement, mais ils peuvent également se produire entre deux ailettes thermiques (fig. 3).

210

MÉTHODES D'ESSAIS NON DESTRUCTIFS





Figure 1 Mode d'éclatement d'un tube lisse en SAP en présence d'un défaut transversal.

Figure 2 Mode d'éclatement d'un tube lisse en SAP en présence d'un défaut transversal,



Figure 3 Eclatement de tubes à ailettes droites en SAP.

La présence de défauts longitudinaux et l'influence de la concentration de contrainte due au facteur de forme (à l'étude) constituent deux problèmes parallèles.

5. Détectabilité des différentes catégories de défauts

Le tableau I, dressé au début de nos recherches et revu en fonction des informations et de l'expérience recueillies, schématise les possibilités

P. BONNET et J. JANSEN

TABLEAU I

	Métrologie	Examen visuel	Binoculaire	Endoscope	Réplique totale (ID)	Liquides pénétrants (OD)	Mesure en résistivité	Isotopes	Rayons X	Courants de Foucault	Ultrasons par impulsion	Ultrasons par résonance
Etude dimensionnelle Longueur Diamètre intérieur " extérieur Epaisseur Flèche Etat de surface	⊕ ⊕ + €	+ +	+	+			•	+	2			œ
<u>Contrôle de qualité</u> Défauts ODT ODL IDT IDL Piqûres, P Inclusions, I Vides, V Etat de surface	-	+ - - 5 - 5 - 5 - 5 - 5	- +	- ` + + - +	+ + + 2	· + + - - 2	- 5 5- 5- 5- 5-		+ + + + ⊕ € + ?	- +5 +5 + + +	⊕ ⊕ ₽ ? ?	

SCHÉMA DES POSSIBILITÉS D'EMPLOI DES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE TND DANS LES TUBES EN SAP POUR LA FILIÈRE ORGEL

Particulièrement adapté

? Possible - Non

+ Oui

.

NOTE: Les abréviations utilisées sont définies aux paragraphes 4.1. et 4.2.

٠

d'emploi des différentes méthodes pour la détection des différents types de défauts et l'étude dimensionnelle.

MÉTHODES D'ESSAIS NON DESTRUCTIFS

II. DESCRIPTION COMPARÉE DE DIFFÉRENTES MÉTHODES DE DÉTECTION DES DÉFAUTS

1, Les ulstrasons

1,1. Conditions d'utilisation dans le cas du SAP

Du point de vue technique, les caractéristiques du matériau et des échantillons amènent à sélectionner une méthode définie comme suit: émission par impulsion, exploitation par réflexion ou transmission, couplage par immersion, fréquences relativement hautes (entre 4 et 10 MHz), focalisation ou collimation du faisceau, injection de ce dernier dans la pièce sous incidence oblique.

Le faisceau d'onde dont il importe peu de préciser ici le type (longitudinal, transversal,Lamb...) chemine dans la paroi du tube entre les surfaces intérieures et extérieures et se réfléchit partiellement sur la discontinuité éventuelle.

Les appareillages acquis ou construits sous contrat répondent au moins partiellement à ces impératifs. Les bancs mécaniques conçus et réalisés par l'EURATOM s'inscrivent également dans cette ligne.

1.2. Méthodes de sondage

1.2.1. Défauts longitudinaux

1.2.1.1. Tubes lisses

Deux méthodes ont été essayées pour la détection des défauts longitudinaux: l'une, par transmission, utilise deux capteurs et l'autre, par réflexion, n'en utilise qu'un seul. Dans les deux cas le tube est immergé mais l'eau ne pénètre pas à l'intérieur.

- Méthodes à deux capteurs

Les deux capteurs sont placés perpendiculairement à l'axe du tube et leur hauteur doit être réglable (fig. 4). La hauteur du capteur-émetteur est réglée de façon que le faisceau pénètre dans le matériau sous l'angle bien défini qui correspond à une sensibilité maximale. Cet angle est fonction de la fréquence, du matériau et aussi de l'épaisseur de la paroi du tube. Il se situe généralement entre 10 et 40° (fig. 5). Le capteur-récepteur est placé toujours perpendiculairement à l'axe du tube, mais déplacé de 180° par rapport au capteur-émetteur, comme indiqué à la figure 1. La figure 6 montre une autre disposition moins commode quant au positionnement. Néanmoins, la réduction du chemin sonore a permis un gain de sensibilité. Cette disposition a été également fructueuse lors du contrôle de tubes de force. Expérimentalement, les meilleurs résultats ont été obtenus pour un émetteur focalisé cylindriquement et un récepteur normal à faces planes.

L'influence de l'état de surface est ainsi nettement diminuée. De plus, le rapport de l'amplitude due à un défaut à celle de l'écho de surface est nettement amélioré.



Figure 4





Figure 5

Schéma du positionnement du capteur dans la méthode à un capteur.



Figure 6

Autre possibilité de positionnement dans la méthode à deux capteurs.

- Méthode à un capteur

Le capteur unique, qui dans ce cas, fait fonction d'émetteur et de récepteur, est réglé de façon semblable au capteur-émetteur utilisé dans la méthode précédente. Il produit une onde sonore qui se propage dans la paroi du tube.

Il a été constaté que la méthode à un capteur pour les essais sur les tubes de gaine en SAP donne une sensibilité supérieure à la méthode à deux capteurs. Elle présente de plus l'avantage d'une mise au point beaucoup plus rapide. Pour le contrôle des tubes de force, cette méthode donne satisfaction pour autant que l'état de surface soit très bon, ce qui n'est pas toujours le cas.

- Comparaison des deux méthodes

Les photographies d'écran de la figure 7 illustrent les formes des échos obtenus par ces deux méthodes.

Dans la méthode à deux capteurs, en l'absence de défaut longitudinal, l'onde continuera à se propager dans la paroi et ne produira pas d'écho. Un défaut, par contre, réfléchira une partie de l'onde vers l'extérieur du tube et donnera un écho.

MÉTHODE À 2 CAPTEURS





METHODE À 1 CAPTEUR

TUBE EN ROTATION







Oscillogrammes montrant la différence entre les méthodes à deux capteurs et à un capteur.

En revanche, dans la méthode à un capteur, en l'absence de défaut, on n'aperçoit sur l'écran qu'un écho dû à la réflexion sur la paroi du tube.

Sur un défaut longitudinal, une partie de l'énergie transmise dans le tube est réfléchie et reprise par le capteur. Ceci se traduit sur l'écran par une déflexion, ou pic, surgissant derrière l'écho de paroi.

L'écho de paroi qui, à première vue, semble nuisible, peut être utilisé de manière fructueuse pour l'étalonnage du gain de l'appareil lors d'essais comparatifs où des résultats reproductibles sont de rigueur.

Comme on le décrit plus loin, le tube est animé d'un mouvement de rotation. De ce fait l'écho d'un défaut d'abord éloigné est d'amplitude faible mais croît jusqu'à un maximum lorsque le défaut est dans la position de réflexion optimale. L'amplitude décroît ensuite jusqu'à extinction totale. Une pose photographique prise pendant cet intervalle montre l'enveloppe des échos. Les clichés du bas de la figure 7 en donnent un exemple.

1.2.1.2. Tubes à ailettes

Le problème de la recherche des défauts longitudinaux dans les tubes à ailettes a été envisagé. Le défaut le plus nuisible se trouve évidemment dans le creux situé entre deux ailettes et plus précisément au raccordement entre ailettes et tube, comme nous l'avons déjà signalé.

- Principe de la mesure

Le tube à contrôler est immergé dans l'eau et pourvu d'un système mécanique lui donnant un mouvement de rotation autour de son axe. Un palpeurémetteur disposé comme le montre la figure 8 envoie un faisceau d'ondes dans l'axe du tube. A l'aide d'un réflecteur judicieusement positionné, ce



Figure 8

Schéma de principe du sondage par ultrasons des tubes à ailettes. Et émetteur R: récepteur

faisceau est réfléchi et arrive perpendiculairement sur la paroi interne du tube. L'ultrason traverse le matériau et est capté par un palpeur-récepteur se trouvant sur la trajectoire. Cette méthode appelée «méthode par transparence» donne une information qui est fonction de l'absorption dans le matériau. Cette absorption étant plus grande à l'emplacement d'une ailette, l'amplitude du signal reçu diminue. Entre deux ailettes l'amplitude sera donc plus grande. La présence d'un défaut sur la trajectoire du faisceau provoque aussi une diminution d'amplitude dont l'importance est proportionnelle à la grandeur du défaut.

- Résultats obtenus

L'enregistrement faisant l'objet de la figure 9, a été obtenu selon la méthode décrite ci-dessus. Dans le tube, un défaut longitudinal réel était présent sur la surface interne. Sur le diagramme obtenu les pointes cor-





Enregistrement obtenu par la méthode indiquée à la figure 8.

respondent au sommet des ailettes tandis que le côté plus arrondi correspond au niveau de la base des ailettes. L'impulsion dont l'amplitude est sensiblement plus grande correspond à une ailette de guidage. Le défaut réel se remarque aisément (défaut de l'ordre de 0,05 mm).

La reproductibilité de ces résultats est absolument parfaite.

1.2.2. Défauts transversaux

Malgré la différence de nocivité de ces défauts par rapport aux défauts longitudinaux, nous avons cependant traité le problème. En effet dans un élément combustible, grappe ou matrice, la présence de la jonction introduit des gradients de température importants au niveau des bouchons et des contraintes axiales importantes. Il est donc préférable d'éliminer les défauts transversaux.

1.2.2.1. Tubes lisses

Comme pour les défauts longitudinaux, le principe consiste à injecter le faisceau ultrasonore obliquement, de façon qu'il rencontre la discontinuité perpendiculairement à sa plus grande dimension. La méthode par réflexion, donc à un capteur, a été retenue exclusivement, car elle allie une sensibilité suffisante dans tous les cas à une plus grande simplicité d'emploi.

Pour cette vérification, le tube complètement immergé est soumis à une rotation continue.

Dans un plan perpendiculaire à l'axe du tube, le tube est mis en place de façon à former avec la paroi, un angle de l'ordre de 30°. Le réglage fin se fait de préférence à l'aide d'un tube-étalon sur lequel on a pratiqué deux défauts transversaux artificiels semblables, l'un sur la paroi intérieure, l'autre sur l'extérieure. L'angle est réglé pour des amplitudes d'écho égales pour les deux défauts.

La plage explorée par le capteur est de quelques centimètres seulement. Pour vérifier le tube sur toute sa longueur, il faut déplacer le capteur le long de celui-ci relativement lentement. Ici aussi, d'ailleurs, les vitesses d'avancement et de rotation sont fonction de l'importance des défauts que l'on désire détecter.

Pour être certain de détecter aussi de petits défauts transversaux mal orientés par rapport au capteur, il est utile de faire une seconde passe, après avoir retourné le tube bout pour bout.

1.2.2.2. Tubes à ailettes

Ce problème n'a pas été étudié.

1.2.3. Défauts divers

Les méthodes décrites ci-dessus donnent des résultats très satisfaisants pour les défauts longitudinaux et transversaux. Toutefois, quand l'état de surface est particulièrement bon, et la vitesse d'exploration lente, on a pu détecter également des inclusions, des vides et des piqûres. Néanmoins, la méthode semble moins adaptée à ces derniers types de défauts et l'on recourt plutôt aux rayons X qui donnent des résultats supérieurs.

1.3. Quelques résultats

A titre d'exemple, nous illustrons ici quelques résultats obtenus par les méthodes décrites pour les tubes lisses. L'étalonnage se fait sur des défauts artificiels d'une profondeur égale à 10% de l'épaisseur de paroi. Le gain du récepteur est réglé de façon que l'écho ait une amplitude égale à la hauteur de l'écran, soit 100%.

Le montage de la figure 7 illustre deux oscillogrammes obtenus en conservant ces réglages.

On ne remarque aucune trace de bruit de fond sur la ligne de base de l'oscillogramme. De fait, par simple augmentation du gain, une augmentation considérable de la sensibilité peut être obtenue de façon immédiate.

Les dispositifs d'enregistrement seront évoqués lors de la description des appareillages utilisés.

1.4. Appareillages

Nous décrivons trois appareillages spécialement adaptés au contrôle des tubes. Les deux premiers comprennent des appareils à ultrasons de série et des ensembles mécaniques construits par l'EURATOM. Le troisième est un modèle unique, dont les caractéristiques spécialement prévues pour le contrôle des tubes de gaine ont été fixées au constructeur par contrat de recherche.

Les appareils électroniques offrent en commun la possibilité d'utiliser des fréquences relativement hautes, et un amortissement soigné de l'impulsion ultrasonore.

MÉTHODES D'ESSAIS NON DESTRUCTIFS

Les bancs mécaniques assurent une exploration hélicoïdale à pas et vitesse variables ainsi que la mise en place précise et stable de deux transducteurs au moins. Des précautions ont été prises pour abîmer le moins possible la surface des tubes.

1.4.1. Banc de laboratoire

Comme un tour d'atelier, le banc anime le tube d'un mouvement de rotation et le capteur d'un mouvement longitudinal. Un bac en plexiglas rempli d'eau contient le mécanisme (fig. 10). Muni à ses extrémités de bouchons centreurs, le tube est pris entre des pointes; un chariot porte-capteur se meut sur des rails (fig. 10). Les deux mouvements sont assurés par motoréducteurs. Le tube n'est soumis à aucun frottement. Les capteurs se mettent en place de façon simple et précise. Ce banc, destiné en principe





Figure 10

Ultrasons. Banc de laboratoire: ensemble et détail des porte-capteurs.

uniquement à des études de développement, permet le contrôle de tubes ne présentant pas de flèche excessive et de longueur limitée à un mètre. L'enregistrement des défauts s'effectue sur bande de papier dont le déplacement est synchronisé avec le déplacement du chariot.

1.4.2. Banc semi-industriel

Le banc soumet le tube à un mouvement hélicoïdal tandis que les transducteurs sont fixes. Un bac en acier inoxydable contient la portion de tube contrôlée ainsi que les transducteurs (fig. 11).





Figure 11 Ultrasons, Banc semi-industriel: ensemble et détail des porte-capteurs.

L'entrée et la sortie du tube dans le bac se font à travers deux buselures en téflon. L'eau suintant par l'intervalle entre le tube et la buselure est recueillie dans de petits bacs latéraux et renvoyée dans le bac principal par pompage. Un dégazage par chicane est prévu dans le bac principal. L'avancement du tube est assuré par un moteur à variateur de vitesse. Le changement de pas s'effectue par modification de l'angle d'attaque de la poulie motrice.

La partie du tube à l'extérieur de la cuve est supportée par des rouleaux à inclinaison variable. Destiné à des contrôles à caractère semi-industriel ce dispositif permet le contrôle de tubes de longueurs indéterminées.

Le tube n'étant soumis à un guidage étroit que sur une portion courte, la flèche a moins d'influence sur l'orientation des capteurs. Néanmoins le tube est soumis à des frottements de la part des buselures et des rouleaux. Ceux-ci doivent être maintenus propres pour éviter l'endommagement de la paroi extérieure.

L'enregistrement se fait sur bande de papier. La vitesse de déroulement est à peu près égale à la vitesse d'avancement du tube.

Deux cents tubes en acier inox de 25,5 mm de diamètre et de 0,4 mm d'épaisseur destinés au gainage du 1^{er} jeu ESSOR ont été ainsi testés.

1.4.3. Appareillage spécial (Ultrasonic)

Réalisé sous contrat, cet appareillage nous a été livré récemment (fig. 12). Les premiers essais commenceront après réception technique.

L'appareillage électronique est prévu pour fonctionner jusqu'à des fréquences relativement élevées (30 MHz). Il est muni d'un dispositif destiné à la mesure de petites épaisseurs avec une précision de l'ordre du pour cent. Un système d'enregistrement particulier permet une localisation angulaire approximative des défauts (voir fig. 13).



Figure 12

Appareil semi-industriel de sondage par ultrasons. Le tube à sonder était en position verticale.



Figure 13

Enregistrement obtenu avec l'appareil présenté à la figure 12, sur tube en aluminium AS de 25,5 mm de diamètre et 1 mm d'épaisseur.

A l'inverse des deux autres dispositifs, le banc mécanique de cet appareillage maintient le tube en position verticale. Le système porte-capteur est animé d'un mouvement de rotation, tandis que l'avancement du tube est purement longitudinal. La commutation des capteurs s'effectue selon un procédé simple protégé par un brevet.

Ce système permet le contrôle de tubes de longueur limitée à 1,75 m. L'incidence de la flèche dépendra de l'efficacité du système de guidage de la roue porte-capteur. Réglé de manière trop précise, ce dernier aurait d'ailleurs tendance à endommager le tube.

Les qualités de cet ensemble le destinent plus particulièrement à des contrôles de tubes ayant des parois très minces (diamètre 25 mm, épaisseur < 0, 1 mm).

2. La radiographie

2.1. Conditions d'utilisation dans le cas du SAP

Cette méthode a été retenue à titre de recoupement et de contrôle. Elle allie à une sensibilité suffisante <u>a priori</u> une facilité d'emploi relative et permet en plus l'établissement d'un document parlant qui peut être consulté à tout moment.

Elle nous est apparue efficace et tout à fait valable pour les tubes de force. Pour les tubes de gaine, la méthode est plus critique, vu la faible dimension des défauts que l'on veut détecter. Néanmoins la radiographie nous fournit des indications intéressantes sur les inclusions lourdes et même sur les cavités, tandis que les ultrasons se sont montrés plus sensibles aux discontinuités, genre fissures et rayures.

De plus, la radiographie peut être précieuse pour des études particulières relatives à la localisation précise des défauts et à la détermination de leur forme. Cette partie sera développée par JANSEN [2]. On doit cependant noter que la radiographie rotative donne de bons résultats pour les tubes de force et la radiographie par roulement pour les tubes à ailettes.

Une restriction est à faire sur la recherche des défauts longitudinaux qui sont localisés au pied des ailettes, le défaut se confondant avec le changement de noircissement du film.

3. Les courants de Foucault

3.1. Conditions d'utilisation dans le cas du SAP

Dans le domaine industriel, cette méthode a remporté un grand succès pour le contrôle de tubes et de barres rondes. Elle suppose en effet de grandes vitesses de défilement et se complète très facilement de mécanismes d'alimentation et de contrôle automatique.

Le contrôle de qualité que nous désirons effectuer est beaucoup plus rigoureux et la sensibilité demandée pose de sérieux problèmes quant à l'élimination d'indications parasites dues aux irrégularités dimensionnelles de la pièce, aux variations de la matière, et même aux vibrations lors du passage dans les bobines. De plus, les vitesses de défilement élevées rendent aléatoire la localisation d'un défaut et son inscription sur document graphique de dimension convenable.

3.2. Moyens d'investigation

3.2.1. Impulsion

Une voie d'approche intéressante consiste à remplacer les ondes sinusoïdales par des impulsions, riches en harmonique, dont on observe les altérations dans la pièce. Les premiers résultats obtenus ont fait l'objet d'une publication [3].

3.2.2. Appareils commerciaux

Le bon sens conseille d'éliminer ou au moins d'atténuer les inconvénients cités plus haut. C'est ainsi que les vibrations sont pratiquement supprimées par un dispositif de guidage précis. Des recherches sont en cours sur la diminution de la vitesse de défilement (fig. 14).

On tente également de déterminer les conditions d'incidences optimales de différents types de défauts artificiels sur les variations de phase et d'amplitude de courants.

4. Les examens visuels

4.1. Conditions d'utilisation dans le cas du SAP

La plupart des défauts rencontrés se traduisent par des altérations de la surface. L'examen visuel simple ou à l'aide d'instruments optiques est donc précieux non seulement pour une appréciation préliminaire superficielle



Figure 14

Ensemble montrant l'appareil de sondage par courants de Foucault et le dispositif de contrôle.

de la qualité, mais aussi pour la confirmation d'indications fournies par d'autres méthodes et la localisation plus précise d'un défaut. Il semble_de plus qu'à ce jour, ce soit la méthode la plus sûre pour le contrôle de tubes à ailettes.

4.2. Instruments optiques. Microscope binoculaire et endoscope

La superficie externe du tube se contrôle au microscope binoculaire à faible grossissement. Placé sur un berceau à rouleaux, le tube s'explore commodément. La superficie interne se vérifie au moyen d'un endoscope. Ici aussi un mécanisme d'exploration mécanique se révèle indispensable. Néanmoins, et particulièrement à l'endoscope, le contrôle est lent et fatigant pour l'opérateur.

4.3. Liquides pénétrants

Les produits les plus adaptés à nos besoins sont du type fluorescent sous lumière ultraviolette. L'objectivation des défauts détectés par l'opérateur est aléatoire, mais nous espérons faire un pas dans ce sens en mesurant les dimensions et l'intensité lumineuse des taches fluorescentes. Des essais particuliers sont poursuivis en vue d'étendre l'emploi de cette méthode à l'inspection de la paroi interne du tube par inspection endoscopique de la fluorescence sous radiation ultraviolette.

4.4. Réplique totale

La méthode d'ALFILLE [4] consiste à prendre un moulage de la paroi interne du tube sur une fine pellicule en latex. Cette réplique fournit des indications au moins aussi détaillées que les classiques répliques en vernis; en outre son bas prix autorise des opérations de démoulage plus simples.

L'observation au microscope est moins fatigante et aléatoire que l'exploration endoscopique. Elle exige néanmoins des précautions quant à l'éclairage et rend préférable l'emploi d'un instrument spécialement adapté tel que le microscope à coupe lumineuse Zeiss.

Les essais préliminaires ainsi que des consultations techniques montrent que la méthode est adaptable à un stade semi-industriel. Moyennant quelques précautions, les répliques pourront être conservées dans les dossiers des tubes.

5. Métrologie dimensionnelle

5.1. Conditions d'utilisation dans le cas du SAP

Les principales mesures à effectuer sont le diamètre interne et l'épaisseur. Le diamètre externe et la flèche doivent être également contrôlés.

Les tubes de gaine ont des longueurs allant jusqu'à 3 m et des diamètres internes inférieurs à 32 mm. De plus la structure du SAP pose un problème particulier: d'une part l'alumine raie les touches de palpage ordinaire et, d'autre part, celles-ci endommagent la surface pour peu qu'elles subissent un frottement ou que la pression soit trop élevée. Les méthodes sans contact ou à très faible pression sont donc préférables.

L'adaptation de ces techniques ne constitue guère un problème spécifique; nous nous bornerons donc à citer quelques procédés qui ont donné des résultats satisfaisants.

5.2. Mesure d'épaisseur

5.2.2. Ultrasons

La méthode par mesure du temps de parcours de l'impulsion semble moins satisfaisante que celle par résonance. Une étude a permis l'application sous eau de cette dernière.

5.2.3. Radiations bêta [5,6]

Deux institutions ont conduit sous contrat EURATOM des recherches indépendantes.

L'Istituto Sperimentale Metalli Leggeri (ISML), se plaçant dans l'optique d'un contrôle de fabrication, a appliqué avec plein succès cette méthode à la détermination des épaisseurs de tubes lisses. Une étude mathématique des résultats permet également le calcul d'autres paramètres tels que excentricité et ovalisation. Les premiers résultats sur tubes à ailettes sont encourageants.

Le Technisch Nationaal Onderzoeck (TNO) a étudié cette question plus particulièrement sous l'angle de l'emploi optimal des radioisotopes. Il semble que la vitesse de contrôle soit encore justiciable d'améliorations importantes. Néanmoins et, dans l'état actuel, cette méthode semble être la seule applicable pratiquement à la mesure des épaisseurs sur tubes à ailettes.

5.2.4. Métrographe

Cet appareil consiste essentiellement en deux bras parallèles, longs, fins et rigides, articulés sur lames croisées de façon à éliminer jeu et frottement. La pression des touches de mesure est constante et très faible, ce qui permet un étalonnage de la flexion des bras. Les mouvements relatifs de ceux-ci sont mesurés par capteur capacitif, et enregistrés électriquement. La largeur du tube mesurée est limitée à 800 mm à chaque extrémité (fig. 15).



Figure 15

Métrographe - Appareil à mesurer les épaisseurs et les diamètres.

5.3. Mesure de diamètre interne et externe

Cette mesure peut également s'effectuer par métrographe. Nous disposons aussi d'un tampon pneumatique à laminage direct permettant la mesure simultanée de trois diamètres à 120° et de la valeur moyenne du diamètre. Ces quatre mesures s'effectuent en des points distants axialement de 40 mm (fig. 16). Nous avons amélioré la méthode en utilisant des capteurs basse pression branchés sur le circuit. On obtient l'enregistrement représenté à la figure 17, les profils des 3 diamètres à 120°. On peut également obtenir par la même méthode le diamètre moyen.

15*





Figure 16

Appareil de mesure par jauges pneumatiques: ensemble et détail d'une jauge.







III. APPLICATIONS

1. Quelques résultats

La présentation de défauts et des résultats de détection par l'une ou l'autre méthode est désormais classique. Nous nous limiterons donc, à titre d'exemple, à un seul défaut bien particulier et à l'illustration de résultats obtenus en laboratoire.

Le montage de la figure 18 montre un défaut longitudinal (ODL) sur la surface externe, causé par l'arrachement et l'éparpillement d'inclusions lourdes (I) lors de l'extrusion.

- Le grandissement linéaire de l'image est de 6.
- La radiographie a été faite au moyen d'un tube à fenêtre de béryllium anticathode de $1,5 \times 1,5$ mm, débit maximal 20 mA, tension 25 kV.
- L'enregistrement ultrasonore a été fait dans les circonstances suivantes: technique par réflexion (1 capteur) sous immersion. Sonde focalisée (MHz).
- L'examen par courants de Foucault a été fait à titre de confirmation dans des conditions très particulières.
- La réplique totale se fait par coulage rotatif de latex prévulcanisé, et séchage à 100°C pendant une heure. Notons que cette technique est ordinairement appliquée à la seule paroi interne.

L'exemple ci-dessus montre les possibilités de recherche de défauts en laboratoire. Cette recherche assez poussée est appliquée systématiquement dans le cas de containers pour capsules d'irradiation ou de tout autre gainage demandant des spécifications sévères.

Dans le cas de contrôle de demi-série (par ex.: lot de 200 tubes en acier inox du 1^{er} jeu ESSOR) nous nous sommes limités à un nombre plus restreint de tests:

- 1. examen visuel,
- 2. ultrasons,
- 3. métrologie fine.

En effet toute campagne d'essais non destructifs doit être liée aux conditions d'emploi du matériau et doit répondre aux demandes réalistes des utilisateurs.

IV. ESSAIS NON DESTRUCTIFS SUR ÉLÉMENTS COMBUSTIBLES

Ces tests sont désormais classiques; aussi ne rappellerons-nous ici que les principaux contrôles effectués, sans en préciser les paramètres d'emploi [7].

Radiographie

Les extrémités de tous les crayons sont contrôlées par radiographie (fig. 19). Dans certains cas, des crayons sont complètement radiographiés afin de détecter les vides.

DÉFAUT LONGITUDINAL



PHOTO RÉELLE



ULTRASONS

RAYONS X



COURANTS DE FOUCAULT



RÉPLIQUE LATEX

Figure 18

Exemple de défaut réel et illustration des différentes techniques.

Détection des fuites

12.12

Avant assemblage, les crayons sont placés, pendant au moins 15 h, dans une chambre sous une pression d'hélium de 30 atm. Puis, après cette mise sous pression, les crayons sont placés sous vide et l'hélium qu'ils pouvaient éventuellement contenir est détecté au moyen d'un spectromètre de masse.





Figure 19

Ensemble de l'appareil à rayons X et exemple de radiographie de bouchons.

Cette méthode permet de garantir une étanchéité supérieure à $2 \cdot 10^{-7}$ torr·l/s (fig. 20).



Figure 20 Ensemble de l'installation de ressuage d'hélium.

Métrologie

Une métrologie précise de tous les sous-ensembles est effectuée avant montage des éléments combustibles (grilles, bouchons, rotules, etc.). Pour l'instant cet ensemble de tests est amplement suffisant pour nos applications.

CONCLUSION

L'application rigoureuse et l'adaptation spécifique de méthodes classiques ont rendu possible le contrôle de la qualité de matériaux nucléaires.

Les contrôles effectués dans cet optique deviennent trop lents et coûteux pour être admis dans un contexte industriel. Ils se justifient néanmoins au stade expérimental et pour le cas où un contrôle de qualité poussé est demandé dans des conditions particulières parfois difficiles.

Dans le cas d'éléments combustibles pour un réacteur de puissance, le constructeur s'approchera au maximum du schéma évoqué dans cette publication. Une optimisation entre le coût du contrôle et le risque d'une rupture de gaine devra être envisagée.

REMERCIEMENTS

Nous remercions particulièrement M.E. Borloo de son aide dans l'élaboration des programmes, et MM. G. Battagin, W. Krischer, F. Lutchmans, H. Mahler, P. Mandrier et A. Philippe de leur active participation à ces travaux.

REFÉRENCES

- [1] BONNET, P. et GRIN, M., Contribution à l'étude de la fragilité du SAP, EUR 218 f (1962).
- [2] BONNET, P. et JANSEN, J., Utilisation de la radiographie basse tension pour la détection de défauts dans les tubes à parois minces en poudre d'aluminium frittée, voir ces comptes rendus.
- [3] PHILIPPE, A., Contribution à l'étude des courants de Foucault par impulsion, EUR 356 f (1963).
- [4] ALFILLÉ, L., AZAM, N. et FIGNON, M., Application de la technique de «réplique totale» à la détection de défauts sur la surface intérieure des tubes, Rev. Métall. (Mai 1961) 429-36.
- [5] ROBBA, M., Controllo spessimetrico a raggi
 ß su tubi di lega leggera a parete sottile, 4 Seminario «PROVE NON DISTRUTTIVE» (Gènes 12-13 nov. 1964) Communications privées.
- [6] PLATZEK, P. et KRUGERS, J., Die Wahl des geeignetsten Isotops und genügender Quellenstärke (Source Strength) für ein gegebenes Massendifferenzproblem, Kerntechnik <u>3</u> 2 (1961) 71.
 PLATZEK, P. et MEIJER, A.C., Meting van variaties in wanddikte bij lange rechte buizen, Beschrijving en beproeving van de definitieve meetopstelling, Centraal Laboratorium TNO (7 janv. 1965) (Recherches effectuées dans le cadre du contrat EUR/C/2720/4/61).
- [7] BRIOLA, J. et HEUBNER, U., Fabrication des éléments combustibles ECO en carbure d'uranium, EUR 2214 f (1965).

BIBLIOGRAPHIE

EURATOM, Euratom's scientifics Activities - ORGEL Program, Part II, Experimental Studies EUR 1830e(1964).

P. BONNET et J. JANSEN

DISCUSSION

C.A. MANN: In the ultrasonic flaw test what is the test speed and what calibration standards are used?

P. BONNET: The speed can be varied over a wide range. For various reasons, which are not all intrinsically connected with the ultrasonic technique, we keep to a speed of 1-2 revolutions per second and a pitch of 1-3 mm.

For calibration we choose from the batch to be tested a tube showing minimal signs of defects. On the internal and external walls of this tube we mill axial and radial slits whose depth is equal to 0.1 of the thickness. As a result of a proposed modification in our procedure the depth of the slits will in future be only 0.05 of the thickness.

ДЕФЕКТОСКОПИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ

В.В. ГОРСКИЙ, В.М. ЗАХАРОВ, Г.А. НИКИТИН, В.К. ПОПОВ, В.Т. ПРОНЯКИН, Б.С. ХОДУЛЕВ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР,МОСКВА СССР

Abstract — Résumé — Аннотация — Resumen

FLAW DETECTION IN THIN-WALLED TUBES. The author considers the special features and advantages of ultrasonic methods of detecting flaws in thin-walled tubes by means of Lamb's waves and describes the apparatus used.

In addition to standard methods of inspecting and testing tubes, ultrasonics and eddy currents are now widely used in detecting concealed defects (fissures, non-metallic inclusions, foliation, blisters), deep notches, cracks and scratches on inner surfaces, determining grain size, and measuring wall thickness and corrosion depth. For the ultrasonic detection of flaws in thin-walled tubes using Lamb's waves one must work on the relatively flat parts of the dispersion curves. For example, greatest sensitivity to foliation during inspection by the reflection method is possessed by anti-symmetrical waves of the first and second modes. The author shows the effect of non-uniform thickness and ovalness of tubes on signal fluctuations in inspection by the shadow method.

Metal structure is tested by the "ratio" method based on a comparison between signals of different trequency which are reflected by or which pass through the materials.

In smooth and finned thin-walled tubes with diameters of 3 to 60 mm and wall thickness of 0.2 mm or more, made of stainless steel, high-nickel, zirconium, aluminium and other alloys, defects are detected with IDTs-3M, IDTs-5, UDT-4M, UKT-2 and other ultrasonic apparatus. Inspection is carried out by the immersion technique, the shadow method and the reflection method with working frequencies up to 10 MHz. Positive detection is achieved of defects over 0.5 mm in length and with a depth of 5% of the wall thickness. Grain size is controlled by USAD-61 structure analysers.

Eddy-current apparatus is used for measuring the wall thickness of tubes made of non-magnetic materials.

DÉFECTOSCOPIE DES TUBES A PAROIS MINCES. L'auteur examine les particularités et les avantages de la défectoscopie par ultrasons (ondes de Lamb) des tubes à parois minces et il décrit les installations employées à cet effet.

Outre les méthodes courantes qui sont actuellement employées pour contrôler et essayer les tubes en vue de découvrir des défauts cachés (fissures, impuretés non métalliques, exfoliations et boursouflures) et des entailles profondes, fissures et égratignures à la surface interne, on emploie aussi - lors des essais de corrosion des échantillons - les ultrasons et les courants de Foucault pour déterminer la grandeur du grain ou pour mesurer l'épaisseur des parois et la profondeur de la corrosion. Pour la défectoscopie par ultrasons (ondes de Lamb) des tubes à parois minces, il faut utiliser les secteurs à pente relativement douce des courbes de dispersion. Ainsi, lorsqu'on a recours à la méthode de la réflexion, ce sont le premier et le deuxième mode des ondes antisymétriques qui possèdent la plus grande sensibilité à l'égard des exfoliations. L'auteur montre l'effet que la différence d'épaisseur des parois et l'ovalisation des tubes exercent sur la fluctuation du signal lorsque

Pour contrôler la structure du métal, on emploie une méthode relative, fondée sur la comparaison des signaux réfléchis ou émergents, les ondes acoustiques utilisées étant de fréquences différentes.

La détection des défauts dans les tubes de 3 à 60 mm de diamètre, à parois minces lisses ou à ailettes d'une épaisseur minimale de 0,2 mm, en acier inoxydable ou en alliage d'aluminium, de zirconium, à forte teneur en nickel, etc., se fait à l'aide des installations IDTs-3M, IDTs-5, UTD-4M, UKT-2, etc. Le contrôle est fait en immersion, par la méthode de l'atténuation et la méthode de la réflexion. Les fréquences de travail peuvent atteindre 10 MHz. On parvient à détecter avec précision les défauts d'une profondeur correspondant à 5% de l'épaisseur des parois et dont la longueur dépasse 0,5 mm. Les dimensions du grain sont vérifiées par des analyseurs de structure du type USAD-61.

Pour mesurer l'épaisseur des parois des tubes en matériau non magnétique, on a recours aux courants de Foucault.

ДЕФЕКТОСКОПИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ. Рассматриваются особенности и преимущества ультразвуковой дефектоскопии тонкостенных труб волнами Лэмба и приводится описание применяемых установок.

Наряду со стандартными методами контроля и испытаний труб в настоящее время для обнаружения скрытых дефектов (трешин, неметаллических включений, расслоений, плен), глубоких рисок, трещин и царапин на внутренней поверхности, для определения размера зерна, для измерения толщины стенки и глубины коррозии при коррозионных испытаниях образцов широко применяются ультразвук и вихревые токи. При ультразвуковой дефектоскопии тонкостенных труб волнами Лэмба необходимо работать на относительно пологих участках дисперсионных кривых. Наибольшей чувствительностью, например к расслоениям при контроле по методу отражения, обладают антисимметричные волны первой и второй мод. Показано влияние разностенности и овальности труб на флуктуацию сигнала при контроле теневым методом.

Для контроля структуры металла применяется метод, основанный на сравнении отраженных или прошедших через металл сигналов на разных частотах.

Дефекты в гладких и ребристых тонкостенных трубах диаметром от 3 до 60 мм с толшиной стенки от 0,2 мм и выше из нержавеющих сталей, высоконикелевых, циркониевых, алюминиевых и других сплавов выявляются на ультразвуковых установках типа ИДЦ-3М, ИДЦ-5, УДТ-4М, УКТ-2 и других. Контроль ведется иммерсионным способом, теневым методом и методом отражения. Рабочие частоты до 10 Мгц. Уверенно выявляются дефекты глубиной 5% от толщины стенки и протяженностью более 0,5 мм. Размер зерна контролируется структурными анализаторами типа УСАД-61.

Для измерения толщины стенки труб из немагнитных материалов(используются приборы вихревых токов.

DEFECTOSCOPIA DE TUBOS DE PAREDES DELGADAS. El autor examina las características y ventajas de la defectoscopia ultrasónica (ondas de Lamb) de tubos de paredes delgadas y describe las instalaciones utilizadas a tal efecto.

Además de los métodos corrientemente empleados para el control y ensayo de los tubos con miras a descubrir defectos ocultos (fisuras, inclusiones no metálicas, exfoliaciones y picaduras), así como ranuras profundas, fisuras y rayas en la superficie interna, en los ensayos de corrosión de muestras se emplean ampliamente ultrasonidos y las corrientes de Foucault para determinar el tamaño de los granos, medir el espesor de las paredes y la profundidad de la corrosión. En la defectoscopia ultrasónica (ondas de Lamb) de tubos de paredes delgadas, es indispensable trabajar en los tramos de pendiente relativamente suave de las curvas de dispersión. Por ejemplo, cuando las exfoliaciones se controlan por el método de reflexión, el primer y segundo modos de las ondas antisimétricas son los más sensibles. El autor pone de manifiesto la influencia ejercida por los distintos espesores de paredes y la ovalidad de los tubos sobre las fluctuaciones de la señal cuando el control se efectúa por el método de atenuación.

Para controlar la estructura del metal, se utiliza un método basado en la comparación de las señales reflejadas o que atraviesan el metal, utilizando ondas acústicas de distintas frecuencias.

Para detectar los defectos en tubos de paredes delgadas lisos y con aletas, de diámetro comprendido entre 3 y 60 mm, y con un espesor de paredes de 0,2 mm como mínimo, de acero inoxidable, o de aleaciones de circonio, aluminio, de elevado contenido de níquel, etc., se utilizan instalaciones ultrasónicas de tipo IDTS-3M, IDTS-5, UDT-4M, UKT-2 y otras. El control se lleva a cabo por inmersión utilizando el método de atenuación y el de reflexión. Las frecuencias de trabajo son de 10 MHz como máximo. Pueden detectarse con precisión defectos de una profundidad que corresponde al 5% del espesor de pared y de 0,5 mm de longitud como mínimo. El tamaño de los granos se determina con un analizador de estructura tipo USAD-61.

Para medir el espesor de las paredes de los tubos fabricados con materiales no magnéticos, se recurre a las corrientes de Foucault.

В последние годы проблеме контроля качества тонкостенных труб, идущих на изготовление оболочек тепловыделяющих элементов, технологических каналов, систем управления и защиты и др. элементов атомных реакторов, уделяется исключительно большое внимание.

Наряду со стандартными методами контроля и испытаний труб в настоящее время для обнаружения скрытых дефектов (трещин, неметаллических включений, расслоений, плен), глубоких рисок и царапин на внутренней поверхности трубы, определения размера зерна, измерения толщины стенки и коррозии образцов при автоклавных испытаниях широко применяются ультразвук и вихревые токи.

В СССР работа проводится как в направлении разработки теоретических основ ультразвуковой дефектоскопии [1-3,12-15] и дефектоскопии вихревыми токами [4-8], так и в направлении создания высокочувствительной электронной аппаратуры и конструкции протяжных механизмов [9].

В ряде организаций разработан целый ряд установок для дефектоскопии тонкостенных труб. Эти установки успешно работают на заводах, изготовляющих трубы, и широко используются в исследовательских лабораториях.

Проведенные исследования и накопленный опыт показывают, что ультразвуковые дефектоскопы более чувствительны к мелким внутренним дефектам и рискам на поверхности трубы, чем аппаратура вихревых токов. Поэтому последняя в основном применяется для измерения толщины стенки труб и образцов при коррозионных испытаниях.

В докладе рассматриваются некоторые вопросы теории ультразвуковой дефектоскопии тонкостенных труб и приводится описание применяемой дефектоскопической аппаратуры.

1. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ДЕФЕКТОСКОПИИ ВОЛНАМИ ЛЭМБА

а. Обнаружение дефектов

В установках для ультразвуковой дефектоскопии труб используются теневой метод и метод отражения.

Чувствительность к мелким дефектам при ультразвуковом контроле по методу отражения значительно выше, чем при контроле теневым методом, однако в ряде случаев, например при контроле ребристых труб небольшого диаметра, а также при выявлении дефектов протяженностью менее 1,0 мм, теневой метод контроля себя хорошо зарекомендовал.

Для контроля тонкостенных труб чаще всего используются нормальные волны, или волны Лэмба.

Как известно [10], упругие колебания в твердом теле описываются волновым уравнением

$$\frac{\partial^2 \vec{S}}{\partial t^2} = V_e^2 \text{ grad div } \vec{S} - V_t \text{ rot rot } \vec{S}, \qquad (1)$$

где \vec{S} - вектор смещения частиц, V_e и V_t - скорости распространения продольной и поперечной волн в твердом теле неограниченных размеров.

В тонкой пластине можно возбудить бесконечное число волн, однако их можно подразделить на два основных вида: симметричные и антисимметричные.

На рис.1 показано изменение формы пластины при возбуждении в ней обоих типов волн.

Дисперсионные уравнения, описывающие распространение нормальных волн в пластине, помещенной в жидкость, имеют вид [1]:

а) для симметричных колебаний

В.В. ГОРСКИЙ и др.

$$\frac{\operatorname{th}(\xi \, h/2)}{\operatorname{th}(\nu \, h/2)} - \frac{4K^2 \, \nu \, \xi}{(K^2 + \xi^2)^2} + i \, \frac{\rho_0 K^*_t \, \nu \, \operatorname{th}(\xi \, h/2)}{\rho \sqrt{K_c^2 - K^2} (K^2 + \xi^2)^2} = 0; \tag{2}$$

б) для антисимметричных колебаний

$$\frac{\operatorname{th}(\nu h/2)}{\operatorname{th}(\xi h/2)} - \frac{4\mathrm{K}^2 \nu \xi}{(\mathrm{K}^2 + \xi^2)^2} + \mathrm{i} \frac{\rho_0 \mathrm{K}_{\mathrm{t}}^4 \nu}{\rho \sqrt{\mathrm{K}_0^2 - \mathrm{K}^2} (\mathrm{K}^2 + \xi^2)^2 \operatorname{th}(\xi h/2)} = 0, \quad (3)$$

где $\nu = \sqrt{K^2 - K_e^2}$, $\xi = \sqrt{K^2 - K_t^2}$, $K_e = \omega / V_e$ и $K_t = \omega / V_t$

волновые числа продольных и поперечных волн для данного материала;
 K₀=ω/V₀ – волновое число для жидкости;
 ρ и ρ₀ плотности материала и жидкости;
 h - толщина пластины.



Рис.1

Изменение формы пластины при возбуждении в ней симметричных (а) и антисимметричных (б) волн.

Корни дисперсионных уравнений К – комплексные. Действительная часть корня дает фазовую скорость, мнимая – амплитудный коэффициент затухания. Полагая $\rho_0=0$ (это упрощение не вносит больших погрешностей) и решая уравнения (2) и (3), получим дисперсионные кривые $V_{\Phi}=\varphi(f \cdot h)$.

На рис.2 в качестве примера приведены дисперсионные кривые для пластин из нержавеющей стали.

Для возбуждения волн Лэмба необходимо обеспечить совпадение проекции вектора скорости падающей плоской волны с фазовой скоростью одной из мод волн Лэмба

236



Дисперсионные кривые $V_{\Phi} = \varphi(f \cdot h)$ для пластин из нержавеющей стали. Углы θ рассчитаны для воды...

$$V_{\Phi n} = V_0 / \sin \beta_n , \qquad (4)$$

где β_n = θ_n - угол падения, при котором возбуждается волна порядка "n" с фазовой скоростью V_{Φn}.

Симметричные волны представляют собой волны сжатия, распространяющиеся в тонкой пластине. Поэтому для них справедливы соотношения:

$$S_{\parallel} \neq 0, S_{\perp} \equiv 0, /y = 0/.$$

В случае антисимметричных колебаний картина обратная:

$$S_{ll} \equiv 0, S_{l} \neq 0 / y = 0/.$$

Отношение компонент смещений частиц на поверхности ненагруженной пластины

для симметричных колебаний

$$\frac{S_{\perp}}{S_{\#}} = \frac{2\nu K}{\xi^2 + K^2} th \frac{\nu h}{2} , \qquad (5)$$

для антисимметричных колебаний

$$\frac{S_{\perp}}{S_{\ell}} = \frac{2\nu K}{\xi^2 + K^2} \operatorname{cth} \frac{\nu h}{2} , \qquad (6)$$

где S₁ и S_{\parallel} - компоненты смещения частиц в продольном и поперечном направлениях.

Выражения для коэффициентов затухания волн Лэмба в симметрично нагруженной пластине, вызванного рассеянием энергии ультразвуковых волн в жидкости, имеют вид [1]:

а) для симметричных волн

$$\alpha_{s} \left\{ \frac{h}{2} \left[\frac{1}{\xi} \left(th \frac{\xi h}{2} - cth \frac{\xi h}{2} \right) - \frac{1}{\nu} \left(th \frac{\nu h}{2} - cth \frac{\nu h}{2} \right) \right] + \left[\frac{1}{\nu^{2}} + \frac{1}{\xi^{2}} - \frac{2}{K^{2}} \left(\frac{3k^{2} - \xi^{2}}{k^{2} + \xi^{2}} \right) \right] \right\} = \frac{\rho_{0} k_{1}^{4} th (\xi h/2)}{4 \rho k^{4} \xi \sqrt{k_{0}^{2}/k^{2} - 1}};$$
(7)

б) для антисимметричных волн

$$\alpha_{a}\left\{\frac{h}{2}\left[\frac{1}{\nu}\left(th\frac{\nu h}{2}-\operatorname{cth}\frac{\nu h}{2}\right)-\frac{1}{\xi}\left(th\frac{\xi h}{2}-\operatorname{cth}\frac{\xi h}{2}\right)\right]+$$
(8)

$$+ \left[\frac{1}{\nu^2} + \frac{1}{\xi^2} - \frac{2}{K^2} \left(\frac{3k^2 - \xi^2}{k^2 + \xi^2}\right)\right] = \frac{\rho_0 k_t^4}{4\rho k^4 \sqrt{k_0^2/k^2 - 1} \operatorname{th} \xi h/2}$$

Вычисленные по этим формулам коэффициенты затухания симметричных α_s и антисимметричных α_a колебаний видов a_0, S_0, a_1 , и S_1 , при $0 \le f \cdot h \le 8$ мггц. мм приведены на рис.3.

Зависимость амплитуды волн Лэмба от угла падения β ультразвукового пучка, полученная из расчета поля волн Лэмба, возбужденных в пластине круглым поршневым излучателем [2], имеет вид

$$\Phi_{1}(\beta) = \left\lfloor \frac{2I_{1}[k_{0}a \sin(\theta_{n} - \beta)]}{K_{0}a \sin(\theta_{n} - \beta)} \right\rfloor,$$
(9)

где β - угол между нормалями к поверхностям излучателя и пластины; а - радиус излучателя;

 θ_n — угол падения, при котором в пластине возбуждается волна Лэмба порядка "n.".

Функция $\Phi_1(\hat{\beta})$ нормирована к единице при $\theta_n = \hat{\beta}$.

Формула (9) справедлива для волн с не слишком большим затуханием при условии, что $K_0 a \gg 1$, $K_0 R \sin^2 \theta_n \gg 1$, $R > \hat{a}^2 / \lambda_0 \cos (\theta_n - \beta)$, где R - расстояние от излучателя до пластины.

Дифракционное расхождение пучка волн Лэмба в пластине можно определить по формуле:

$$\Phi_{2}(\Psi_{0}) = \left[\frac{I_{1}[2 \sin \theta_{n} \cdot \sin \Psi_{0}/2\sqrt{1 - \sin^{2}\theta_{n} \cdot \sin^{2}\Psi_{0}/2} K_{0}a]}{\sin \theta_{n} \cdot \sin \Psi_{0}/2\sqrt{1 - \sin^{2}\theta_{n} \cdot \sin^{2}\Psi_{0}/2} K_{0}a}\right], \quad (10)$$



Рис.3

Зависимость коэффициентов затухания α_s и α_a от $\mathbf{f} \cdot \mathbf{h}$ для стальной пластины в воде.

которая справедлива при упомянутых выше условиях. Здесь Ψ_0 - угловая полярная координата точки наблюдения.

Направленность пучка нормальных волн ухудшается с уменьшением угла θ_n . Последнее объясняется тем, что колебания возбуждаемые под большими углами θ_n , имеют меньшую длину волны.

Вычисленные по формулам (9) и (10) зависимости $\Phi_1(\beta)$ и $\Phi_2(\Psi_0)$ приведены на рис. 4.5.

Для получения необходимой чувствительности при контроле труб волнами Лэмба необходимо правильно выбрать угол падения β, частоту и тип колебаний.

При этом необходимо учитывать и то, что для обнаружения дефектов важно знать направление смещения частиц при колебаниях и характер изменения коэффициента затухания ультразвука. С увеличением частоты ультразвуковых волн чувствительность к дефектам повышается, однако это не всегда оказывается оправданным из-за сложности настройки и работы с высокочастотной аппаратурой.

Очевидно, что, изменяя угол падения ультразвукового пучка, в пластине, при заданном значении f h, можно возбудить различные моды и типы колебаний. Существуют разные точки зрения на выбор типа колебаний для выявления тех или иных дефектов. Так, например, Польман [11] считает, что симметричными волнами лучше выявляются дефекты типа расслоений, а антисимметричными волнами -поверхностные дефекты и неметаллические включения.

В работах, выполненных в СССР [12], было показано, что наибольшей чувствительностью к расслоениям при контроле по методу отражения обладают антисимметричные волны мод а₁ и а₂.

Включения лучше выявляются антисимметричными волнами более низких мод. Очень важно правильно выбрать рабочий участок на дисперсионной кривой. При работе на крутопадающем участке кривой $V_{\phi} = \varphi(f \cdot h)$ (рис.2)



Рис.4

Зависимость амплитуды волн Лэмба Φ_1 (β) от угла падения ультразвукового пучка. а) – f = 0,6 мггц, k₀ а = 32,7, мода S₀; б) – f = 1,3 мггц, k₀ а = 62,6, мода S₁.



Характеристика направленности пучка нормальных волн в пластине. а) — f = 1,3 мггц, а = 11,5 мм, β = 12,5°, мода S₂; 6) — f = 1,3 мггц, а = 11,5 мм, β = 23°, мода a₁.

происходит расширение возбуждаемого импульса, сильнее сказываются интерференционные явления и, как показывают исследования, могут возникать ложные отраженные импульсы, обусловленные разностенностью контролируемой трубы. При работе на крутопадающем участке кривой V_φ=φ(f·h) допускается изменение угла падения β в относительно широких пределах. Более благоприятные условия работы получаются на пологой части кривой, однако здесь необходима точная установка угла падения β .

Поэтому обычно выбирается относительно пологий участок кривой V_Ф = $\varphi(f \cdot h)$. Выявляемость дефекта определенного вида зависит от направлений смещений частиц в упругой волне.

Поверхностные дефекты, расположенные перпендикулярно к направлению распространения волны, будут выявляться лучше при условии $S_{\perp} \cong 0$ и $S_{\parallel} \neq 0$, а расслоения вблизи поверхности при условии $S_{\parallel} \neq 0$ и $S_{\perp} \neq 0$.

При иммерсионном методе контроля значительная часть распространяющейся в пластине ультразвуковой энергии излучается в окружающую среду, чем в основном и определяется затухание волн Лэмба. На рис.З зависимости коэффициентов затухания на излучение первых двух мод при прозвучивании стальной пластины в воде. Коэффициенты затухания в материале пластины симметричных α_s^i и антисимметричных α_a^i волн можно определить из уравнений

$$\alpha_{s}^{!} = A_{s} \alpha_{e} + B_{s} \alpha_{t}$$

$$\alpha_{a}^{!} = A_{a} \alpha_{e} + B_{a} \alpha_{t} ,$$
(11)

где α_e и α_t - коэффициенты затухания продольных и поперечных волн, A_a , A_s , B_a и B_s - вспомогательные коэффициенты (зависимости их от f h приведены на рис.6).

Рабочий участок выбирается на пологой части зависимостей $\alpha = F(f \cdot h)$ и $\alpha' = F'(f \cdot h)$. Если при контроле возбуждаются сразу несколько мод, то необходимо выбирать участки, на которых коэффициенты затухания для этих мод примерно равны.

б. Контроль структуры

Ультразвуковой контроль структуры основан на использовании зависимости коэффициента затухания ультразвуковых колебаний от величины зерна.

Однако рассеяние зависит не только от среднего размера зерна D, но также от длины волны λ ультразвуковых колебаний, анизотропии отдельных кристаллитов и их взаимного расположения.

В зависимости от отношения λ/D различают три области рассеяния, хотя единого мнения о границах этих областей нет (табл.1).

Вычисленные согласно теориям разных авторов коэффициенты рассеяния довольно сильно отличаются друг от друга и от значений, полученных экспериментально. Наиболее близки к эксперименту выводы, полученные Меркуловым [13] на основании теории Лифшица и Пархомовского [14]. Максимальная чувствительность к зерну имеет место в релеевской области ($\gamma \sim \overline{D}^3$). В диффузионной области рассеяние обратно пропорционально размеру зерна, поэтому при переходе от релеевской к диффузионной области имеется максимум рассеяния для данного размера зерна. Это подтверждается и экспериментально (рис.7).

Во избежание неоднозначности, частоту ультразвуковых волн следует выбирать такой, чтобы при максимально возможном изменении зерна в контролируемых трубах не было перехода из одной области в другую.



Зависимости вспомогательных коэффициентов от f \cdot h: $a-A_a,\ B_a\,; \ \ 6-A_s,\ B_s$.

В качестве примера на рис.8 показана зависимость затухания поперечных ультразвуковых волн от отношения λ/\overline{D} для стали 1X18Н9Т.

Поскольку скорость поперечных волн ниже скорости продольных, той же чувствительности к зерну при работе на поперечных волнах можно достичь при частотах в 1,5-2 раза ниже, чем на продольных.

Для разбраковки труб по размеру зерна применяются как абсолютный, так и относительный методы. При контроле абсолютным методом неоднородность структуры оценивается по скорости затухания амплитуды донного сигнала при многократном отражении. Коэффициент затухания а вычисляется по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{2l} \ln \frac{A_n}{A_{n+1}},$$
 (12)

где 1 - длина образца;

16*
Таблица 1

ГРАНИЦЫ ДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЗАКОНОВ РАССЕЯНИЯ

Область рассеяния	Закон рассеяния для металлов с кубической системой кристаллической решетки [13, 15]	Границы области		
1	2	3		
Релеевское рассеяние	$\gamma_e = \frac{8\pi^3 \mu^2 \operatorname{Tf}^4}{375} \left(\frac{2}{\rho^2} v_e^3 \left(\frac{2}{v_e^5} + \frac{3}{v_t^5} \right) \right)$	$\lambda \ge 3 \overline{D} \qquad [13] \\ \lambda \ge 10 \overline{D} \qquad [19]$		
Промежуточная область	$\gamma_{\rm e} = \frac{16\pi^2 \mu^2 \overline{\rm D} f^2}{525 v_{\rm e}^6 \rho^2}$	8 ÷ 10 $\overline{D} > \lambda > 4 \overline{D}$ [13] 3 $\overline{D} > \lambda \ge \frac{1}{3} \overline{D}$ [17]		
Диффузионная область	$\gamma_e = \frac{\overline{R}}{\overline{D}}$	$\lambda \leq \frac{1}{2} \overrightarrow{D} \qquad [15]$ $\lambda \leq \frac{1}{3} \overrightarrow{D} \qquad [18]$		

 $\gamma_{\rm e}$ -коэффициент рассеяния продольных волн; μ $= C_{11} - C_{12} - 2 C_{44};$ Cik -модули упругости монокристаллов; $\mathbf{T} \approx \mathbf{\widetilde{D}}^3$ -средний объем отдельного зерна; v_eиv_t -скорость продольных и поперечных волн; -частота; f -плотность; ρ Ŕ - средний коэффициент отражения (по давлению) упругой волны от границ кристаллов.

A_n и A_{n+1} амплитуды двух последовательных отраженных сигналов. Контроль структуры по скорости затухания ультразвуковых колебаний осложняется из-за влияния интерференции и при контроле тонкостенных труб применяется редко.

Более совершенен относительный метод контроля [19]. Рассеяние ультразвуковых колебаний в исследуемом образце оценивается по отношению амплитуд донных отраженных или прошедших (при теневом методе) сигналов при прозвучивании на разных частотах и неизменной величине коэффициента усиления дефектоскопа. Степень рассеяния ультразвука определяется по так называемым структурным коэффициентам

$$K_1 = \frac{A_{f2}}{A_{f1}}; \qquad K_2 = \frac{A_{f3}}{A_{f1}}...,$$
 (13)

где A_{f1}, A_{f2}, A_{f3}.... - амплитуды принятых сигналов при заданном значении коэффициента усиления де́фектоскопа и частотах ультразвуковых колебаний f₁ < f₂ < f₃....

Частота ультразвуковых колебаний f₁ выбирается такой, чтобы для крупнозернистого материала A_{f1} ≠0.



Рис.7

Зависимость коэффициента затухания ультразвуковых волн от размера зерна.



Зависимость коэффициента затухания продольных ультразвуковых волн в стали 1Х18Н9Т от отношения λ/D̄.

Относительный метод контроля оказался весьма эффективным и для контроля интенсивности коррозии в образцах при коррозионных испытаниях. Для определения структуры тонкостенных труб большой интерес представляет интерференционный способ. Как известно, при прохождении ультразвуковой волны через тонкую пластину величина прошедшего или отраженного сигнала зависит от соотношения толщины пластины h и длины волны λ . Если изменять λ , то прошедший сигнал будет периодически при-



Зависимость коэффициента пропускания η от частоты нормально падающей ультразвуковой волны для находящихся в воде пластин из стали 1X18Н9Т толщиной 1 мм, имеющих различные коэффициенты затухания α.

нимать максимальное и минимальное значения (рис.9). Можно показать, что их отношение M связано с коэффициентом затухания α ультразвуковой волны следующим уравнением:

$$\alpha h = \ln \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} + \frac{1}{2} \ln \frac{M+1}{M-1}, \qquad (14)$$

где Z₂ и Z₁ - акустические импедансы материала и среды.

В системе координат h, ln $\frac{M+1}{M-1}$ получается прямая линия с угловым коэффициентом $1/2 \alpha$. Величина отраженного сигнала связана с M более сложной зависимостью. Разность частот, соответствующих максимальному и минимальному значениям прошедшего сигнала, определяется толщиной пластины h и скоростью ультразвука в материале пластины C

$$\Delta f = f_{\max} - f_{\min} = \frac{C}{4h}.$$
 (15)

Прибор для определения размера зерна интерференционным способом разработан в 1963 году [20] .

2. УСТАНОВКИ ДЛЯ ДЕФЕКТОСКОПИИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ

Для выявления дефектов в тонкостенных трубах из нержавеющих сталей, высоконикелевых, циркониевых, алюминиевых и других сплавов диаметром от 3 до 60 мм с толщиной стенки от 0,2 мм и выше используются ультразвуковые установки типа ИДЦ-3м, ИДЦ-5, УДТ-4м, УКТ-2 и другие.



Рис.10 Установка ИДЦ-ЗМ.

а. Установки для ультразвукового контроля методом отражения

Установка ИДЦ-Зм является наиболее распространенной для ультразвуковой дефектоскопии труб диаметром от 10 до 60 мм с толщиной стенки от 0,3 до 3 мм и длиной до 6 м иммерсионным способом. Установка (рис.10) состоит из механизма для вращательно-поступательного перемещения трубы, малогабаритной ванны, имеющей боковые отверстия со сменными резиновыми кольцами – уплотнениями для ввода в ванну трубы, поддерживающих трубу вращающихся люнетов и ультразвукового дефектоскопа. На корпусе ванны располагаются два ультразвуковых пьезощупа с цилиндрическими фокусирующими линзами. Положение пьезощупов относительно трубы регулируется микрометрическими винтами. Один из пьезощупов настраивается на выявление дефектов, расположенных вдоль оси трубы, а второй – поперек. Уровень воды в ванне автоматически повышается или понижается при вводе трубы в ванну и выходе ее из ванны. В основе принципа действия импульсного дефектоскопа лежит метод отражения.

Рабочие частоты ультразвука 1,2, 2,5 и 3,7 мггц. Длительность импульса 0,5-5 мксек, частота посылок импульсов 1000 в сек.

Для повышения помехоустойчивости введена временная селекция сигналов.

При появлении отраженного сигнала (дефект в стенке трубы) протяжный механизм останавливается. Трубы с толщиной стенки 1-3 мм контролируются поперечными волнами на частоте 2,5 мггц.

Уверенно выявляются дефекты в виде трещин, рисок, закатов глубиной 2-3% от толщины стенки и протяженностью 2-3 мм, расположенные как на внешней, так и на внутренней поверхностях труб.

Для контроля труб с толщиной стенки 0,2-1,0 мм используются моды a₀,S₀, a₁ и S₁ волн Лэмба.



Рис.11 Установка УКТ-2.

Уверенно выявляются трещины, закаты и риски глубиной более 5% от толщины стенки трубы и протяженностью более 2-3 мм. Трубы диаметром 3-10 мм контролируются на установках ИДЦ-5 и УДТ-4м.

Установка ИДЦ-5 предназначена для контроля труб диаметром 5-10 мм. По конструкции она аналогична установке ИДЦ-3 м и отличается от нее только устройством пьезощупа. Последний снабжен акустическим экраном, который предотвращает попадание на пьезощуп отраженных от поверхности трубы ультразвуковых волн. Рабочая частота 2,5 мггц. На этой установке уверенно выявляются дефекты глубиной 8-10% от толщины стенки трубы протяженностью 2-3 мм.

На установке УДТ-4м контролируются трубы диаметром от 3 до 10 мм иммерсионным способом. Рабочая частота 4,5 мггц. Выявляются дефекты глубиной 5% от толщины стенки и протяженностью более 0,5 мм.

б. Установки для ультразвукового контроля теневым методом

Установка УКТ-2 предназначена для ультразвуковой дефектоскопии труб диаметром от 8 до 50 мм с толщиной стенки от 0,2 до 1,0 мм и длиной до 7 м теневым иммерсионным методом.

Установка (рис.11) состоит из механизма для вращательно-поступательного перемещения труб, малогабаритной ванны, импульсного ультразвукового дефектоскопа, прибора для измерения толщины стенки методом вихревых токов (описание его приведено в заключительном разделе) и регистрирующего прибора.

Поскольку контроль дефектов осуществляется теневым методом, то на амплитуду сигнала на приемном пьезощупе влияют разностенность и эллиптичность труб и т.д. Была изучена зависимость амплитуды сигнала от изменения толщины стенки (рис.12 а). При толщине стенки трубы 0,52мм



Зависимость амплитуды сигнала: а-от толщины для находящейся в воде пластины из стали IX18H9T при f = 10 мггц, β = 34° (мода a₀); б-от угла падения для находящейся в воде пластины из стали IX18H9T при f = 10 мггц, h = 0,52 мм (мода a₀).

изменение сигнала (рис.12 а) с учетом 5% допуска на толщину, составляет всего 2-3%. Значительно большее изменение сигнала вызывает эллиптичность трубы, приводящая к изменению угла входа (рис.12 б). С учетом кривизны поверхности трубы, эта зависимость выражена слабее, однако она достаточно велика. Так, например, овальность трубы диаметром 40 мм порядка 1 мм вызывает изменение сигнала при вращении трубы на 25-30%. В связи с этим особое внимание было обращено на конструкцию датчиков. Конструкция ультразвуковых датчиков с излучающим и приемным пьезощупами для контроля труб диаметром от 8 до 25 мм и от 25 до 50 мм показана на рис.13. Датчик подвешивается в ванне на четырех пружинах и опирается на трубу центрирующей призмой, которая при настройке перемещается относительно корпуса микрометрическим винтом. Поверхность граней центрирующей призмы покрывается износостойким пластиком (капрон, пентан) или к ней припаиваются твердосплавные пластинки. На боковых стенках ванны имеются обоймы, в которые вставлены центрирующие (по размеру трубы) кольца из фторпласта-4 и уплотнительные резиновые кольца.

После ввода трубы в ванну уровень воды в ней поднимается и датчик прижимается к трубе. Результаты измерений записываются на диаграммную бумагу. Выбор основных рабочих параметров дефектоскопа производится с учетом оптимальных требований, сформулированных в первом разделе доклада. При контроле труб с толщиной стенки 0,2 ÷ 0,5 мм возбуждались волны a₀ и a₀ + S₀. Рабочие частоты выбирались в пределах 7,5 -10 мггц, так что использовался участок кривых 1,5 ≤ f · h ≤ 5 мггц · мм. Если f · h ≤ 3, возбуждается волна a₀, при f · h > 3, вследствие большой ширины ультразвукового пучка (2 мм), возбуждается суммарная волна a₀ + S₀.

При f h> 8 большая часть энергии звуковых волн распространяется по внешней поверхности стенки, то есть сумма волн $a_0 + S_0$ по своим физи-



Рис.13



Рис.14 Схема прохождения ультразвуковой волны в ребристой трубе.

ческим свойствам приближается к поверхностной волне и чувствительность к дефектам, лежащим на внутренней стенке трубы, сильно понижается. Поэтому при контроле труб с толщиной стенки 0,5 ÷ 1,0 мм частота снижается до 5 ÷ 7,5 мггц. При выборе рабочих участков на дисперсионных кривых учитывалась также зависимость коэффициентов затухания волн Лэмба от f.h. Как видно из рис.3, $\alpha_{a0} - F_a$ (f.h) в интервале 1,5 ≤ f.h ≤ 5 является монотонно возрастающей функцией. В интервале 3 ≤ f.h ≤ 5 $\alpha_{s_0} = F_s$ (f.h) – также монотонно изменяющаяся функция.

При такой настройке дефектоскопа амплитуда сигнала на дефекте в стенке трубы типа трещины, неметаллического включения, риски глубиной 10% от толщины стенки и протяженностью 0,4÷0,5 мм уменьшается на 15-25%. При этом флуктуации сигнала не превышают 10%.

Для дефектоскопии ребристых труб разработаны специальные установки с многощуповыми головками. Так, в установке УДР-1 контроль труб ве-









Рис.15 Фотографии макрошлифов участков трубс дефектами: а-цепочка шлаковых включений: б-закат (плена); в-глубокая риска; г-трещина на внутренней поверхности.

дется теневым методом. Схема прозвучивания одной парой пьезощупов показана на рис.14. Регистрация качества труб производится на дефектограммах. На дефекте глубиной 50 мк амплитуда сигнала уменьшается на 20%. Флуктуация сигнала на годной трубе не превышает 10%. Таким методом хорошо выявляются дефекты протяженностью более 0,4 мм. Для возбуждения и приема ультразвуковых колебаний используются излучатели диаметром 2,5 мм из керамики ЦТС-19 или титаната бария. Частота колебаний выбирается такой, чтобы возбуждались волны a_0 , S_0 . Это соответствует пологому участку дисперсионных кривых $V_{\Phi} = \phi(f \cdot h)$ при $f \cdot h = 3 \div 4$ МГГЦ ММ И УГЛЕ $\beta \cong 30^{\circ}$. Для труб с толщиной стенки 0,25 \div 0,6 мм частота ультразвуковых колебаний 6 \div 12 МГГЦ. На рис 15 в качестве иллюстрации приведены макрошлифы дефектных участков труб: цепочка шлаковых включений в трубе с толщиной стенки 0,6 мм, закат (плена), глубокая риска на внутренней поверхности трубы, надрыв в трубах с толщиной стенки 0,4—0,5 мм.

в. Ультразвуковые структурные анализаторы

Структурный анализатор – дефектоскоп УСАД-61 работает на частотах 0,63; 1,25; 2,5; 5,0 и 10,0 мггц и позволяет проводить структурный анализ металла с величиной зерна от 7 до 1 балла. Длительность ультразвукового импульса ~4 мксек. Прибор снабжен плавным и ступенчатым аттенюаторами для абсолютных измерений затухания. Глубиномер позволяет измерять время прохождения импульса с точностью до 1%. В комплект прибора входит набор щупов: нормальных на частоту 10 и 2,5 мггц, угловых на частоту 10 и 2,5 мггц с углами падения ультразвука 30°,50°, 64° и прямых двойных на частоту 10 и 2,5 мггц. Пьезоэлементы всех щупов изготовлены из кварца X – среза. Структурный анализатор НИИХИММАШ, работает на частотах 0,7; 1,4; 2,8; 5,6; 11,2 мггц.

Преобразователь - пластинки из кварца X - среза, имеющая основную частоту 11,2 мггц. Дефектоскоп - структуромер УЗДС-18 работает на частотах 0,5; 1,0; 1,75; 2,5 и 4 мггц. Имеет калиброванный ступенчатый аттенюатор, позволяющий ослаблять сигнал до 61 дб ступенями через 1 дб. Для увеличения чувствительности к дефектам применены пьезопреобразователи увеличенного диаметра. Пьезоэлементы - кварц X - среза.

г. Прибор для измерения толщины стенки труб

Рассматриваемый прибор входит в комплект установки УКТ-2. Его блок-схема приведена на рис.16. Сигнал разбаланса резонансного измерительного моста, вызванного изменением импеданса рабочей катушки при прохождении мимо нее трубы, усиливается дифференциальным усилителем и подается на кольцевой фазовый детектор. По второму каналу (генераторфазовращатель-фазоинвертор) на фазовый детектор подается регулируемое по фазе опорное напряжение для отстройки от воздушного зазора между рабочей катушкой и трубой. Продетектированный сигнал усиливается и подается на измерительный прибор и сигнализатор брака. В приборе имеется устройство для проверки работы генератора, усилителя и калибровки.

Прибор может работать в широком диапазоне частот (1-500 кгц).

На частоте 100 кгц стенка трубы из аустенитной нержавеющей стали толщиной 0,2-0,8 мм измеряется с точностью не хуже 2%.

Напряжение на выходе резонансного моста определяется по формуле:

$$U = \frac{U_r}{2} \sqrt{\frac{r^2 + x^2}{(2g_2 + r)^2 + x^2}} e^{i\varphi},$$
 (16)



Рис.16

Блок-схема прибора для измерения толщины стенки трубы.

где
$$\varphi$$
 = arctg $\frac{2g_{9}x}{2g_{9}r + r^{2} + x^{2}};$

$$\mathbf{r} = \frac{\Delta \mathbf{R}}{\omega \mathbf{L}_{0}};$$
$$\mathbf{x} = \frac{\Delta \omega \mathbf{L}}{\omega \mathbf{L}_{0}};$$

Ur - напряжение генератора; $Q_9 = \frac{1}{g_9} = \frac{\omega L_0}{R}$ - добротность измерительной ветви моста; R - активное сопротивление рабочей катушки с эталонным образцом;

ωL₀ - индуктивное сопротивление рабочей катушки без образца;

ΔR, ΔωL - приращения активного и индуктивного сопротивлений рабочей катушки, вызванные изменением вихревых токов к контролируемой трубе (относительно эталонной). Для уменьшения фазовых погрешностей моста на высоких частотах искусственно понижается добротность моста. При фазовой отстройке от зазора прибор измеряет проекцию вектора напряжения, вызванного изменением импеданса катушки при измерении толщины стенки трубы, на направление вектора опорного напряжения, сдвинутого по фазе на 90° по отношению к вектору измеряемого напряжения. На рис.17 показан датчик толщиномера. Рабочая катушка 2 помещена в следящую за трубой подвеску. Подвеска прижимается к трубке упорами на шарикоподшипниках. При изменении диаметра трубы изменяется расстояние между осями шари-





Датчик толщиномера: 1-компенсационная катушка; 2-рабочая катушка.



Рис.18



азор 0 мм; ●●● зазор 0,15 мм; ХХХ зазор 0,30 мм.

коподшипников. Компенсационная катушка 1 устанавливается в специальное устройство, где крепится компенсационный эталон.

Рабочая и компенсационная катушки имеют наружный диаметр около 6 мм и намотаны манганиновым проводом на ферритовом стержне. На рис. 18 приведены зависимости показаний прибора от толщины стенки трубы при разных зазорах между катушкой и трубой. Точки пересечения кривых с осью абсцисс соответствуют толщинам стенки эталонных труб.

В.В. ГОРСКИЙ и др.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] МЕРКУЛОВ Л.Г., Акустический журнал 10 2 (1964) 206.
- [2] ДИАНОВ Д.Б. и ЖАРКОВ К.В. Акустический журнал 10 1 (1964) 48.
- [3] ВИКТОРОВ И.А. и ЗУБОВА О.М. Акустический журнал 9 1 (1963) 19.
- [4] ДОРОФЕЕВ А.Л., Неразрушающие испытания методом вихревых токов (1961).
- [5] СОБОЛЕВ В.С., Журнал Известия СО АН СССР 2 вып.1 (1963) 78.
- [6] СОБОЛЕВ В.С., Журнал Известия СО АН СССР 2 вып.1 (1964) 34.
- [7] СОБОЛЕВ В.С., Журнал "Измерительная техника" 3 (1964) "47.
- [8] ДОРОФЕЕВ А.Л., ШКАРЛЕТ Ю.М. и СОБОЛЕВ В.С., Сборник "Неразрушающие методы контроля материалов и изделий" (1964) 370, 382, 432.
- [9] Аппаратура неразрушающего контроля (1963).
- [10] МОРС Ф.М., и ФЕШБАХ Г., Методы теоретической физики 1 (1958) 141.
- [11] POHLMAN R., Z. Blech 4 6 (1957) 25.
- [12] БАРЫШЕВ С.Е., ЛИТВИНЦЕВ А.И., и ШАНЬКОВА З.И., Сборник "Неразрушающие методы контроля материалов и изделий" (1964) 153.
- [13] МЕРКУЛОВ Л.Г. Журнал технической физики 26 (1956) 64.
- [14] ЛИФШИЦ И.М., и ПАРХОМОВСКИЙ Г.Д., Журнал экспериментальной и теоретической физики 20 (1950) 175.
- [15] МЕРКУЛОВ Л.Г., Журнал технической физики 27 (1957) 1045.
- [16] MASON W.P. and McSKIMIN H.J., J.Acoustical Society of America, 19 (1947) 464.
- [17] HUNTINGTON H.B., J. Acoustical Society of America, 22 (1950) 362.
- [18] MASON W.P., and McSCIMIN H.J., J. Appl. Physics 19 (1948) 946.
- [19] ХИМЧЕНКО Н.В., Авторское свидетельство СССР № 101297 (1955).
 [20] ГРЕБЕННИК В.С., ЕРМОЛОВ И.Н. и КРАКОВЯК Н.Ф., Авторское свидетельство CCCP № 165 002 (1963).

DISCUSSION

D.C. WORLTON: How does the incident beam angle depend on the wall thickness and is incident beam angle a critical adjustment?

V.V. GORSKY: The angle of incidence of the ultrasonic beam is chosen according to tube-wall thickness and frequency. Normally we use the modes a_0 and S_0 . We have not observed any further relationship between angle of incidence and tube-wall thickness.

D.C. WORLTON: What is the effect of tube radius on Lamb wave theory?

V.V. GORSKY: The curvature of the tube wall has practically no effect on the optimum incident beam angle, which is found from the dispersion curves for a flat plate.

D.C. WORLTON: What is the minimum wall thickness tested ultrasonically?

V.V. GORSKY: 0.2 mm.

R. SHARPE: Would you clarify what you meant when you referred in your oral presentation to the "shadow" method in relation to tube inspection?

V.V. GORSKY: The "shadow" method of inspection is what we call the two-probe sounding scheme, when the defect reflects part of the ultrasonic energy and the shadow, as it were, of the defect is reflected on the pick-up probe.

G. VERSTAPPEN: What are your eddy-current applications? What kind of coils are used and how is the frequency determined?

V. V. GORSKY: We use eddy currents for measuring the wall thickness of tubes made of non-magnetic materials. The coils are mounted externally to the tube. The frequency used for wall-thickness measurements on tubes of austenitic stainless steel is 100 kHz.

J. GERARD: In ultrasonic inspection do you see the internal and external defects with the same sensitivity?

V.V. GORSKY: Cracks with a depth equal to, say, 10% of tube wall thickness are not seen with the same sensitivity on the inner and outer surfaces in ultrasonic inspection by means of Lamb waves. Defects are detected on the inner surface with greater sensitivity. The difference in amplitude of the reflected signals is 20-30%.

· • • • •

•

Session IV

.

.

•

17*

QUALITY SELECTION OF ZIRCALOY-2 CANNING TUBES BY ULTRASONIC TESTING ON SMALL DEFECTS

A. VAN DER LINDE REACTOR CENTRUM NEDERLAND, PETTEN

AND

J.A. DE RAAD

RÖNTGEN TECHNISCHE DIENST N.V., ROTTERDAM, NETHERLANDS

Abstract — Résumé — Аннотация — Resumen

QUALITY SELECTION OF ZIRCALOY-2 CANNING TUBES BY ULTRASONIC TESTING ON SMALL DEFECTS. Zircaloy-2 canning tubes, 10.20 mm I.D. × 0.90 mm wall × 1500 mm length, destined for testing as fuel-rod cladding in a high temperature, 330°C, in-pile pressurized water loop, were tested ultrasonically for defects to get an impression of the tubes' quality. The tested tubes were delivered by manufacturers in the United States of America, United Kingdom and Scandinavia.

Our requirement that all delivered tubes should be free from defects with a length greater than 500-1000 μ m and/or with a depth greater than 50-25 μ m was not completely accepted by the manufacturers. They could guarantee that defects longer than 1000 μ m and/or with a depth greater than 50 μ m should be absent.

Because only two of the 93 tested tubes had defects with a depth greater than 50 μ m it was decided to apply a more severe test by which defects with a depth in the range 10-50 μ m could be detected. To detect and record such small defects, longitudinal as well as transverse, a semi-automatic ultrasonic pulse equipment was used in combination with gating systems and a multiple-channel recorder. The adjustment of the scanning system was such that inner and outer defects of the same size were indicated with equal amplitudes. Calibration of the equipment was made on artificial defects.

Longitudinal defects were detected with a separated transmitter-receiver system using a focused beam. Transverse defects were scanned by a single probe acting as transceiver. To obtain the sensitivity required the tests were carried out in immersion at a frequency of 4 MHz whereby the tubes were rotated with 120 rpm. A description is given of the mechanical device, the general set-up and the difficulties encountered.

The result was that from the 93 tested tubes 21 had defects in the transverse direction with a depth between 10 and 50 μ m. Thus a relative qualification of the tubes was obtained.

CONTRÔLE DE LA QUALITÉ DES GAINES EN ZIRCALOY-2: DÉTECTION DE PETITS DÉFAUTS PAR LES ULTRASONS. Des gaines en Zircaloy-2, ayant un diamètre intérieur de 10,20 mm, une épaisseur de 0,90 mm et une longueur de 1500 mm, destinées à des essais en pile (dans une boucle à eau sous pression, à la température de 330°C) en vue de leur utilisation pour le gainage de barreaux de combustible, ont été soumises à un contrôle au moyen d'ultrasons pour détecter leurs défauts et évaluer leur qualité. Les gaines soumises aux essais avaient été livrées par des fabricants des Etats-Unis, du Royaume-Uni et des pays scandinaves,

D'après les spécifications, toutes les gaines devaient être exemptes de failles ayant plus de 500 à $1000 \,\mu\text{m}$ de longueur et plus de 50 à 25 μm de profondeur, mais les fabricants n'avaient pas accepté de répondre pleinement à ces exigences. Ils pouvaient simplement garantir qu'il n'y aurait pas de failles ayant plus de 1.000 μm de longueur et plus de 50 μm de profondeur.

Comme seulement deux des 93 gaines contrôlées présentaient des failles ayant plus de 50 µm de profondeur, on a décidé de faire un contrôle plus sévère pour détecter des failles de 10 à 50 µm de profondeur. Pour détecter et enregistrer des défauts aussi minimes, on a utilisé un dispositif semi-automatique à impulsions ultrasonores, en même temps que des conditionneurs et un enregistreur multicanal. L'appareil d'exploration était réglé de telle façon que des défauts de même taille étaient indiqués avec la même amplitude, qu'ils soient intérieurs ou extérieurs. L'étalonnage du metériel a été fait au moyen de défauts artificiels. Les défauts longitudinaux ont été détectés au moyen d'un émetteur-récepteur distinct, à faisceau focalisé. Les défauts transversaux ont été détectés par une sonde unique faisant office de traducteur. Pour obtenir la sensibilité voulue, les essais ont été effectués en immersion, avec une fréquence de 4 MHz, les tubes tournant à 120 t/min.

Le mémoire décrit le dispositif mécanique, l'ensemble des opérations et les difficultés rencontrées. On a constaté que, sur 93 gaines contrölées, 21 présentaient des défauts transversaux profonds de 10 à 50 μ m. On avait donc obtenu un classement qualitatif des gaines.

КАЧЕСТВЕННЫЙ ОТБОР ТРУБЧАТЫХ ОБОЛОЧЕК ИЗ ЦИРКАЛЛОЯ-2 ПУТЕМ ВЫ-ЯВЛЕНИЯ НЕБОЛЬШИХ ДЕФЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА. Трубчатые оболочки из циркаллоя-2 с внутренним диаметром 10,20 мм, толщиной стенок 0,90 мм и длиной 1500 мм, предназначенные для проверки в качестве покрытия топливных стержней при температуре 330°С в реакторной петле с водой под давлением испытывались с помощью ультразвука с целью обнаружения дефектов.

Испытываемые трубчатые оболочки были поставлены изготовителями в США, соединенном Королевстве и в Скандинавии.

Наше требование, чтобы все поставленные трубки были свободны от трещин и других дефектов размером свыше 500-1000 микрон по длине и свыше 25-50 микрон по глубине, не было принято полностью изготовителями. Они могли гарантировать только отсутствие трещин величиной свыше 1000 микрон по длине и свыше 50 микрон по глубине.

В связи с тем, что из 93 испытанных труб только у двух были обнаружены трещины величиной свыше 50 микрон по глубине, решили проводить более строгую проверку, в результате которой можно было бы обнаруживать дефекты величиной порядка 10-50 микрон по глубине. Для обнаружения и регистрации таких небольших дефектов применялось полуавтоматическое ультразвуковое импульсное оборудование, действующее как в продольном, так и в поперечном направлениях, в комбинации с системами пропускания и многоканальным регистратором. Система развертки была отрегулирована таким образом, что внутренние и наружные дефекты одного и того же порядка и размера указывались с одинаковыми амплитудами. Калибрование оборудования производили на искусственных дефектах.

Дефекты, образовавшиеся в продольном направлении, обнаруживались с помощью раздельной системы датчик-приемник с применением фокусированного пучка.

Дефекты, образовавшиеся в поперечном направлении, скеннировались с помощью единичного зонда, работавшего в качестве приемопередатчика. Для достижения необходимой чувствительности испытания проводились в состоянии погружения с частотой 4 Мгц, в то время как трубки вращались со скоростью 120 об/мин.

Дается описание механического прибора, общей установки и возникавших трудностей.

В результате из 93 проверенных трубок у 21 были обнаружены дефекты в поперечном направлении величиной от 10 до 50 микрон по глубине. Таким образом, была составлена относительная квалификация трубок.

CONTROL DE CALIDAD DE LOS REVESTIMIENTOS DE ZIRCALOY-2 POR LOCALIZACION ULTRASONICA DE PEQUEÑOS DEFECTOS. Se han efectuado ensayos ultrasónicos con tubos de revestimiento de Zircaloy-2 (diámetro interno 10, 20 mm, espesor 0, 90 mm, longitud 1 500 mm) con objeto de determinar su calidad y localizar posibles defectos. Los tubos se destinan a proteger las barras de combustible a la temperatura de 330°C en un circuito de agua a presión en el interior del ractor.

Los tubos procedían de fabricantes de Estados Unidos, Reino Unido y Escandinavia, que no llegaron a aceptar por completo la condición que se les impuso de que aquéllos careciesen de defectos con dimensiones superiores a 500-1 000 μ m de longitud y 50-25 μ m de profundidad. Lo que garantizaron fue que los tubos no tendrían defectos superiores a 1 000 μ m de largo y 50 μ m de profundidad.

Como únicamente dos de los 93 tubos verificados tenfan defectos de profundidad superior a 50 µm, se decidió someterlos a una prueba más estricta que permitiese localizar defectos de 10 a 50 µm. Para localizar y registrar fallas longitudinales y transversales tan pequeñas se utilizó un equipo semiautomático de impulsos ultrasónicos en combinación con circuitos de desbloqueo y registradores multicanales. El sistema de exploración se ajustó de manera que resultaran indicados con idéntica amplitud defectos internos y externos de iguales proporciones. Para calibrar el equipo, se usaron tubos con defectos artificiales.

Los defectos longitudinales se localizaron con un sistema independiente transmisor-receptor y un haz enfocado. Los transversales se detectaron con una sonda que funcionaba como transceptor. Para lograr la sensibilidad necesaria, los ensayos se efectuaron por inmersión a una frecuencia de 4 MHz, estando los tubos animados de un movimiento de rotación de 120 rev/min. Se incluye en la memoria una descripción de la instalación mecánica y de las dificultades que hubo que superar. Según los resultados obtenidos, de los 93 tubos ensayados, 21 presentaban defectos transversales de 10 a 50 μ m de profundidad. Por consiguiente, puede afirmarse que el procedimiento indicado permite clasificar los tubos con arreglo a su calidad.

INTRODUCTION

The activities of Reactor Centrum Nederland (RCN) at Petten are directed to the development of a nuclear propulsions system for a 65 000-t DWT, 22 000-SHP ship*. The design target is a pressurized-water reactor with internal re-circulation, a thermal rating of 61 MW and a core lifetime of 1200 d at full power.

The fuel rods in this reactor, the NERO reactor, will be of the conventional rod-type; sintered UO_2 pellets enclosed in a 1250-mm-long tube with an I.D. of 10.2 mm. Approximately 60% of all fuel rods in this reactor will have temperatures of 335-345°C at the outer surface of the canning tube.

Because Zircaloy-2 is used extensively in operating PWR's and is the best known zirconium alloy at this moment it was chosen as canning material for producing the fuel rods. However, the increasing embrittlement caused by hydrogen pick-up and the occurrence of fretting corrosion during reactor operation make it questionable if Zircaloy-2 can be used continuously during four years at the relatively high temperatures mentioned. Therefore, a careful control on all tubes for chemical, metallurgical, dimensional and structural integrity is necessary.

The structural integrity of the canning wall is disturbed by the presence of defects, i.e. voids, cracks, holes, foldings etc. These defects not only decrease the effective wall thickness but can also have a deleterious influence on the hydrogen uptake and hydride orientation at the defect. In view of this harmful effect it was decided that only the best tubes should be used for fuelrod production and subsequent testing in high-temperature in-pile loop.

Tube manufacturers, European as well as United States, could only guarantee that defects with a depth greater than 50 μ m would be absent in the delivered tubes. Thus, in order to get a reliable picture of the relative structural integrity of tubes delivered by different manufacturers, a quantitative ultrasonic testing on smaller defects was necessary.

The requirement that hydride platelets formed during corrosion in water or steam at $300 - 400^{\circ}$ C should be oriented tangentially in the tube wall restricted the number of possible manufacturers to two at the time of ordering. A third manufacturer was changing his production scheme to get the required tangential hydride orientation. Thus, with the ultrasonic test procedure presented below, tubes delivered by three manufacturers were tested for defects. The tests were performed by the research department of the Röntgen Technische Dienst (R.T.D.) at Rotterdam, Netherlands.

^{*} The technological part of this development programme is based on a contract between RCN and EURATOM.

DESCRIPTION OF THE EQUIPMENT

Figures 1 and 2, respectively, show a photograph and schematic view of the complete installation for the ultrasonic testing of Zircaloy tubes. The wall-thickness measurements were done with an accuracy of 0.005 mm by conventional resonance-immersion techniques [1], with the use of a Branson Vidigage. These measurements are not presented in this paper. The different parts of the equipment will be successively described below.



Fig.1

Complete installation for ultrasonic testing of Zircaloy tubes

Upper-right: flaw detectors, monitors and recorder Lower-right: rotational and axial transport device Centre : immersion tank with probe assembly Left : wall-thickness equipment



Fig.2

Panoramic arrangement of the probes, immersion tank, guiding and bearing wheels and the transport device

- = wall-thickness probe; W.T. = stainless-steel water tank 500 x 500 x 300 mm;
- L = probes for detecting longitudinal defects;
- T = probe for detecting transverse defects;
- B. W. = nylon guiding and bearing wheels;

w

- P.C. = plastic clamp; C.J. = cardan joint;
- R. M. = rotation motor; A. M. = axial transport motor.

INSTRUMENTS

Commercially available instruments were selected for detecting longitudinal and transverse defects. Both types of defects were detected simultaneously by two separate ultrasonic pulse-echo instruments of the Krautkrämer type, USIP-10. These flaw detectors can provide ultrasonic pulses of 4 MHz at a repetition rate of 500 pulses/s. To avoid phantom indications both detectors were coupled by the synchronization of their freerunning multivibrators.

Flaw echoes and irrelevant signals from the detectors were separated by means of coincidence circuits in Krautkrämer flaw-recording monitors RZ. By means of these monitors flaw echoes can be linearly transformed into a pulse. After the repetition frequency has been amplified and filtered this pulse was fed into a two-channel Offner dynograph recorder with a response of 50 cps square wave.

IMMERSION TANK AND PROBE ASSEMBLY

The stainless-steel tank was filled with distilled water. The desired water level could be adjusted by an overflow system. To pass the tubes through the tank during examination an inlet and an outlet were made. The openings were provided with a cross-shaped indented sponge, avoiding excessive leakage of water. Leakage water was fed back into the tank by a small centrifugal pump.

Figure 3 shows the bottom of the tube alignment and probe assembly.

The Zircaloy tube was kept in accurate alignment with the probes by four sets of three wheels spaced 120° apart. Two sets of these guiding wheels are situated in the tank, the others just outside the tank (see Fig.2).

Rubber "O"-rings mounted on the nylon guiding wheels prevented damage to the tubes' surfaces. The wheels are inclined at a slight angle to promote the transport of the tubing. The ultrasonic probes are mounted in plastics



Fig.3 Bottom view of the probe holder

and stainless-steel holders. The transceiver (combined double probe) used for the detection of transverse defects contained two flat bariumtitanate, 4-MHz crystals acoustically separated by a high sound-absorbing material. Both crystals are cemented on sound-refracting prisms of 80° . Under this condition the angle of refraction in the water, surrounding the probe, is $5^{\circ}20'$. As a result a line-focus could be obtained at ± 12 mm from the probe surface.

The incidence angle of the ultrasonic beam impinging on the tube surface and the distance between the tube and the transceiver can be adjusted in the desired position by means of screw-spindles. The beam axis was directed to the centre of the tube. The separate transmitter and receiver used for detecting longitudinal defects could be adjusted in a vertical and horizontal direction relative to the tube axis. Both probes were placed almost symmetrically on each side of the tube.

These probes also contained flat bariumtitanate, 4-MHz crystals, but were cemented on acoustical lenses to obtain a focused beam with a focal length of 14.0 mm. The crystal size of all probes was 8 mm.

TUBE TRANSPORT ASSEMBLY

The Zircaloy tube was rotated by means of a motor the speed of which can be varied between 90 and 600 rpm. To prevent water entering the tube (which would cause disturbing echoes) both ends of the tubes were closed with a plastic plug. One of the plugs also served the mechanical coupling between motor and tube via a cardan joint.

The tube was moved axially along the ultrasonic probes in the immersion tank by a motor-driven endless chain which was coupled to the rotation motor. The axial speed was adjustable from 22.5 to 150 cm/min. Several sets of guiding wheels assured a straight movement of the Zircaloy tube through the immersion tank. To be sure that angular defects would also be detected, every tube was twice passed through the immersion tank in two apparently opposite directions. For practical reasons the direction of movement was changed by reversing the mechanical attachment to the other end of the tube.

Optimum results were obtained with a test speed of 120 rpm with a pitch of 2.5 mm. Considering the pulse repetition rate of 500 Hz the tube is scanned for longitudinal and transverse defects at every 1.5° of rotation and the tube is examined at the rate of 30 cm/min.

CALIBRATION

To obtain the same flaw-detection sensitivity for inner and outer defects accurate adjustment of the ultrasonic probes was essential. As the behaviour of ultrasound in a tubular specimen is rather complex, a theoretical approach to this problem is very difficult. Therefore, it is common use to calibrate the equipment by means of a tube specimen containing artificial defects with known dimensions. Since a relative qualification of the tubes delivered by different manufacturers is the main purpose of the investigations, it seemed reasonable to test the tubes against calibration tubes delivered by the manufacturers.

However, only one manufacturer could supply such a calibration tube. The standard defects used by this manufacturer were made according to the usual specifications. The normal acceptance level lies below a flaw depth of 0.05 mm and a length of 1mm. In order to detect smaller defects qualitatively it was therefore necessary to produce a tube specimen with smaller inner and outer defects. Longitudinal defects were made with a depth of 0.025, 0.050 and 0.075 mm, a length of 15 mm and a width of 0.2 mm. Transverse defects were made in the form of circular grooves with a varying depth of 0.025 to 0.100 mm on both the inner and outer surface. The width of these grooves was 0.5 mm. All these artificial defects were machined with accurate profiled cutting tools to a depth tolerance of 0.005 mm. Using these calibration tubes the ultrasonic probes were adjusted in the required position. The geometrical arrangement of all probes is illustrated in Figs. 4 and 5. Figure 6 shows two records. The upper one refers to three outer defects. The lower record indicates inner and outer transverse defects of different depths. It is interesting to note that both ends of the artificial longitudinal defects also give a response like the transverse defects. This is clearly shown in the middle of the lower record.



Fig.4

Geometrical arrangement of the longitudinal defects detecting transmitter and receiver

The record of the manufacturers' calibration tube are presented in Fig.7. These records show that inner and outer defects of about the same depths result in nearly the same recording amplitude. At the beginning of the investigations the equipment was calibrated before the examination of each tube. As the equipment proved to be stable, hourly checks were made.



Fig. 5

Geometrical arrangement of the transverse defect detecting transceiver

MODE OF WAVE PROPAGATION IN THE TUBE WALL

When a longitudinal wave of given frequency strikes the interface between water and a metallic tube wall, it may propagate as a longitudinal, shear or Lamb wave. This depends on the angle of incidence and the wall thickness. At a water-zirconium interface [2,3] the critical angle for longitudinal waves is 18°25'. No longitudinal wave will enter into the tube wall at greater angles of incidence. For shear waves the critical angle is 38° 36'.

At some characteristics angles of incidence Lamb waves may occur. The angle of incidence for the detection of longitudinal defects, see Fig. 4, lies from 10° - 45° . About 75% of the impinging ultrasonic beam has an angle of incidence between 18° and 38° , so that most of the refracted ultrasound is expected to propagate in the tube wall according to a shear-wave mode. The angle of incidence for the detection of transverse defects, see Fig.5,



TUBE END

0.075 mm 0.05 mm 0.025 mm OUTSIDE LONGITUDINAL NOTCHES

TUBE END



0.06mm OUTSIDE TRANSVERSE 0.2 X 0.075mm,0.2 X 0.05mm TRANSVERSE INDICATIONS OF LONGITUDINAL NOTCHES 0.1mm 0.025mm 0.05 mm OUTSIDE INSIDE TRANSVERSE

Fig.6

Record of our calibration tube showing the defect amplitude in relation to the defect depth



0.052 mm 0.055 mm OUTSIDE (NSIDE LONGITUDINAL NOTCHES. 0.058 mm 0.06 mm OUTSIDE INSIDE TRANSVERSE NOTCHES:

Fig.7

Record of the calibration tube delivered by one manufacturer

is approximately 34°. Because of the convex surface a considerable part of the incident beam is reflected. The refracted ultrasound is expected to propagate as a shear wave.

TESTS AND RESULTS

93 Zircaloy-2 tubes, 10.20 mm I.D.× 0.90 mm wall thickness × 1500 mm long, delivered by three different manufacturers B, D and E were tested for longitudinal and transverse defects using the equipment and testprocedure as described. None of the records obtained showed the presence of longitudinal defects with a depth greater than 10 μ m. Table I gives the number of tubes found to contain transverse defects for all three makes. The total number of defects is grouped under five columns of increasing severity based on the defect amplitude in millimetres as measured on the records. It is found that, up to indications with an amplitude of 30 mm, there is a linear relation with the depth of the defect. Actually the defect amplitude expressed in millimetres, is approximately equal to the depth of the defect detected, expressed in microns. For defects with greater depth the response is no longer linear and defects over 30 μ m in depth are presented with relatively lower amplitudes.

Figure 8 shows two records of a defective tube of manufacture B, obtained in the two opposite directions of scanning. Figures 9 and 10 show the same for defective tubes of manufacture D and E respectively. From the records it appears that not all defects give a response of the same magnitude in both directions. Some of them are found in one direction only.

For the "B" tubes this was 12 out of 25 defects. For the "D" tubes 10 out of 34, and for the "E" tubes 2 out of 4. The record of the tube of manufacture "D" having the largest defect, is presented in Fig.11.

To obtain a reliable picture of the relative quality of the tubes delivered by the different manufacturers, the defective tubes were divided into four groups according to the largest defect they contained. Tubes showing records with no indications higher than 10 mm were selected as "sound". In Table II this selection is given. The figures in this Table clearly show that the tubes delivered by manufacturer E are much better than those from the other manufacturers.

A detailed study of the records which were obtained of all tubes tested led to the following conclusions:

- (a) The reproducibility of the records was good.
- (b) About 40% of the transverse defects detected are angular.
- (c) Only 2% of the g-3 tested tubes exceeded the rejection level, agreed upon between the manufacturer and the RCN.
- (d) The measurements show unequivocally that the tubes delivered by manufacturer E are much better than those from manufacturer B. These tubes in turn are slightly better than those from manufacturer D. It was found that the results of the wall-thickness measurements, per-

formed simultaneously with the defect measurements, affirm conclusion (d) completely.

NUMBER OF DETECTED TRANSVERSE DEFECTS AS A FUNCTION OF DEFECT AMPLITUDE

.

.

Manufacturer	Number of tubes with defects	Total number of defects	Number of defects with an amplitude in the range of:				
			5 - 10 mm	10-20 mm	20-30 mm	30-40 mm	>40 mm
B	10	25	13	7	3	1	1
D	11	34	15	12	4	2	1
Е	<u>ر</u> 2	4	2	1	1	0	υ



Transverse defect records of a Zircaloy tube delivered by manufacturer B



Transverse defect records of a Zircaloy tube delivered by manufacturer D



Fig.10

Transverse defect records of a Zircaloy tube delivered by manufacturer E

Q

TABLE II

SELECTION OF TUBES ACCORDING TO THE SIZE OF LARGEST DEFECTS THEY CONTAINED

Manufacturer	Number of tested tubes	Sound tubes	Number of tubes showing a record with a maximum amplitude of:				Tested tubes with defects > 20 mm	
			10-20 mm	20-30 mm	30-40 mm	> 40 mm	(%)	
В	30	20	5	3	1	1	16	
D	15	4	6	2	2	1	33	
• E	48	46	. 1	1	0	0	2	

٠



Fig.11

Transverse defect records of the tube delivered by manufacturer D showing the largest defect detected in the tested tubes

ACKNOWLEDGEMENT

The authors wish to thank Mr. A. de Sterke of the R.T.D. for his assistance in preparing this paper.

BIBLIOGRAPHY

GOODWIN, L. E. and HENDRICKS, H. D., Nondestructive test station for Zircaloy-clad reactor fuel, A. E. C. Report DP-851 (1963).

KRAUTKRÄMER, J. und H., in Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Springer Verlag, Berlin (1961).

OLIVER, R. B., McCLUNG, R. W. and WHITE, J. K., in Symp. on Nondestructive tests in the field of nuclear energy, ASTM-STP-223 (1957) 62-79.

REFERENCES

[1] Von LEYSEN, W., Materialprüfung 4 (1962) 407.

[2] HANSTOCK, R.F., LUMB, R.F. and WALKER, D.C.B., Ultrasonics 2 (1964) 109-119.

[3] MCMASTER, R.C., in Nondestructive Testing Handbook, 2, Ronald Press Co. New York (1959) 26-40.

DISCUSSION

R.S. SHARPE: When comparing different suppliers of tubes, did you take into account the amount of inspection carried out by the supplier? Did the supplier inspect to the same standard as yourself?

A. VAN DER LINDE: The three manufacturers mentioned in our paper also used conventional ultrasonic immersion techniques for defect control of the Zircaloy-2 tubes produced. Although there were slight differences in the length of their standard defects, these manufacturers all used longitudinal and transverse defects with a depth of approximately 50 μ m, in both the outer and the inner walls of the tubes, to set the rejection level of their equipment. In order to get a reliable relative assessment of the tubes delivered by these manufacturers, we calibrated our equipment using standard defects with depths ranging from 25 to 100 μ m.

F.H. WELLS: Did you observe any effects of large grain size during your measurements on tube defects?

A. VAN DER LINDE: The noise amplitude on our records caused by wall-thickness variations, tube vibrations and grain boundaries varied from 1 to 3 mm. The minimum interpretable defect amplitude was accordingly set at 5 mm.

.

•

18*

CONTRÔLE AUTOMATIQUE D'ÉLÉMENTS COLAMINÉS

MARIE-THÉRÈSE DESTRIBATS CENTRE D'ÉTUDES NUCLÉAIRES DE SACLAY ET J. DORY RÉALISATIONS ULTRASONIQUES MEAUX (S. & M.), FRANCE

Abstract — Résumé — Аннотация — Resumen

AUTOMATIC INSPECTION OF CO-LAMINATED ELEMENTS. The paper describes an automatic device for the ultrasonic inspection of co-laminated fuel element claddings.

The elements are placed in a stainless-steel tank filled with water and are carried under the ultrasonic beam by rollers. An auxiliary reflector makes it possible to use the same transducer for both emission and reception.

The plates are scanned by six transducers fixed around the edge of a rotating disc, each transducer being brought into action every one-sixth turn by relays triggered by magnetized sectors, so that the ultrasonic pencil traces a series of linked arcs on the surface of the plate. The amount of energy passing through the plate is measured accurately at each point. The measured value is fed into a special recorder which traces a full-scale image of the element inspected (the instrument uses ordinary paper and records by means of carbon paper). Flaws appear as dark patches on the recording. The apparatus can operate either at all-or-nothing response with a pre-determined marking threshold, or at half-tone response.

The transducers, which work on a variable frequency between 3 and 15 MHz, are excited by short pulses; they are of barium titanate and 3 mm in diam. The scanning track can be varied from 0.3 to 0.6 mm, with a linear speed of 5-20 mm/s. The apparatus can accept elements of the following maximum dimensions: width - 150 mm, length - 2000 mm, thickness - 25 mm. Trials already carried out have disclosed unbonded areas of 0.5 mm diam. in elements 2 mm thick.

CONTROLE AUTOMATIQUE D'ÉLÉMENTS COLAMINÉS. Les auteurs décrivent un appareillage automatique destiné à vérifier, par une méthode ultrasonore, la qualité du gainage des éléments colaminés.

Ces éléments, immergés dans une cuve en acier inoxydable remplie d'eau et entraînés par des rouleaux, défilent sous le faisceau ultrasonore. Un réflecteur auxiliaire permet d'utiliser le même traducteur pour l'émission et la réception.

L'exploration des plaques est réalisée par six traducteurs situés à la périphérie d'un disque rotatif. Chaque traducteur est mis en service tous les 1/6 de tour par l'intermédiaire de relais commandés par des secteurs aimantés. De la sorte, le pinceau ultrasonore décrit sur la surface de la plaque une série d'arcs de cercle jointifs. La quantité d'énergie transmise à travers la plaque est mesurée avec précision en chaque point. Le résultat de la mesure est appliqué à un enregistreur spécial qui donne une reproduction en vraie grandeur de l'élément examiné (le papier de l'enregistreur est de type ordinaire; l'inscription s'effectue au moyen de papier carbone). Sur l'enregistrement obtenu, les défauts apparaissent sous forme de taches foncées. L'appareillage peut fonctionner, soit en tout ou rien avec un seuil de marquage prédéterminé, soit en demi-teintes.

Les traducteurs, dont la fréquence peut varier de $3 \ge 15$ MHz, sont excités par des impulsions brèves. Les traducteurs utilisies, en titanate de baryum, ont un diamètre de 3 mm. Le pas d'exploration est variable de $0.3 \ge 0.6$ mm, la vitesse linéaire étant de $5 \ge 20$ mm par seconde. L'ensemble peut recevoir des éléments ayant les dimensions maximales suivantes: largeur 150 mm, longueur 2000 mm, épaisseur 25 mm. Les essais effectués jusqu'à ce jour ont permis de déterminer des zones décollées de 0.5 mm diamètre dans de éléments de 2 mm d'épaisseur.

АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ УЛЬТРАЗВУКОМ СОВМЕСТНО ПРОКАТАННЫХ ЭЛЕ-МЕНТОВ. Дается описание автоматического устройства для проверки ультразвуковым методом качества герметизации совместно прокатанных элементов.

Исследование пластинок осуществляется с помощью шести преобразователей, расположенных на периферии вращающегося диска. Каждый преобразователь приводится в дей-

275

ствие в 1/6 круга с помощью реле, управляемого магнитными секторами. При этом ультразвуковой луч выписывает на поверхности пластинки серию соединяющих дуг окружности. Количество передаваемой через пластинку энергии точно измеряется в каждом пункте. Результат измерения задается специальному регистратору, который воспроизводит натуральную величину изучаемого элемента на бумаге обычного типа (нанесение текста осуществляется через копировальную бумагу). На полученной таким образом записи дефекты выступают в виде темных пятен. Устройство может работать с помощью рычага отмыкания при заранее заданном маркировочном пороге, либо на полутенях.

Преобразователи, частота которых может колебаться от 3 до 15 Мгц, возбуждаются короткими импульсами. Применяемые преобразователи на титанате бария имеют диаметр 3 мм.

Шаг развертки составляет 0,3-0,6 мм, а линейная скорость -5-20 мм/сек. Устройство может изучать элементы следующих максимальных размеров: ширина -150, длина -2000 и толщина -25 мм. Проведенные до сих пор опыты позволили установить отслоенные участки диаметром 0,5 мм в элементах с толщиной 2 мм.

METODO PARA LA VERIFICACION AUTOMATICA DE ELEMENTOS COLAMINADOS. Se describe en esta memoria un aparato automático destinado a verificar, por un método ultrasóniso, la calidad de las vainas fabricadas con elementos colaminados.

Estos elementos movidos por rodillos pasan bajo el haz ultrasónico sumergidos en una cuba de acero inoxidable llena de agua. Un reflector auxiliar permite utilizar los mismos transductores para la emisión y la recepción. La exploración de las placas se lleva a cabo mediante seis transductores dispuestos en la periferia de un disco rotativo. Los transductores entran en función uno tras otro, cada 1/6 de vuelta, por intermedio de un sistema relés accionados por sectores imanados. De esta manera, el haz ultrasónico describe sobre la superficie de la placa una serie de arcos de circunferencia tangentes entre sí. La cantidad de energía transmitida a través de la placa se mide con precisión en cada punto y el resultado de la determinación se aplica a un registrador especial que reproduce a tramaño natural el elemento inspeccionado (el papel del registrador es de tipo corriente y la inscripción se realiza mediante papel carbónico). En el registro así obtenido, los defectos aparecen en forma de manchas oscuras. El aparato puede trabajar como «todo o nada» con umbral de registro predeterminado, o bien hacerlo con tintes intermedios.

Los transductores, cuya frecuencia puede variar de 3 a 15 MHz, se excitan mediante impulsos breves. Los transductores utilizados son de titanato de bario y tienen un diámetro de 3 mm. El paso de exploración puede de 0,3 a 0,6 mm y la velocidad lineal est comprendida entre 5 y 20 mm/s. El conjunto puede admitir elementos de las siguientes dimensiones máximas: longitud 2000 mm, ancho 150 mm, espesor 25 mm. Los ensayos realizados hasta la fecha han permitido determinar zonas despegadas de 0,5 mm de diámetro, en elementos de 2 mm de espesor.

Les méthodes de contrôle ultrasonore sont maintenant trop connues dans l'industrie, et, en particulier, dans l'industrie nucléaire, pour qu'il soit nécessaire d'en décrire en détail les principes de base.

Les techniques ultrasonores s'avèrent particulièrement intéressantes pour l'examen des éléments colaminés; la sensibilité des ondes acoustiques aux variations d'impédances des milieux traversés y est mise à profit pour déceler des manques d'adhérence ou des inclusions de dimensions très réduites, moyennant, bien sûr, l'utilisation d'un appareillage convenable.

Mais si les possibilités et la sensibilité de la méthode sont incontestées dans cette application particulière, il lui est souvent reproché, par contre, une vitesse d'exploration superficielle relativement faible et la difficulté d'obtenir les résultats de contrôle sous forme de documents faciles à interpréter.

Il faut reconnaître que ces reproches sont, en grande partie, justifiés. Les méthodes ultrasonores sont en effet handicapées par le fait que, dans l'état actuel de la technique, le contrôle ne peut se faire que point par point, au moyen d'un faisceau ultrasonore mobile. Des dispositifs spéciaux permettent bien de former des images acoustiques pouvant être transformées en images optiques par l'intermédiaire de systèmes convertisseurs, ceci en partant d'un faisceau ultrasonore de grande ouverture, mais les appareillages disponibles à ce jour ne peuvent être considérés comme parfaitement au point.

C'est pour remédier aux inconvénients cités plus haut qu'a été étudiée la machine qui va maintenant être décrite. Cette machine, destinée à contrôler industriellement et en série des éléments colaminés, utilise un certain nombre de dispositifs originaux, lesquels lui confèrent une excellente résolution (de l'ordre de 1 mm) jointe à une vitesse d'analyse intéressante, et, surtout, la possibilité d'obtenir des enregistrements à l'échelle I des plaques contrôlées, avec reproduction des demi-teintes. Ces enregistrements, effectués sur papier ordinaire, permettent de repérer avec précision: la position des défauts détectés, la forme des zones non adhérentes, la position du noyau.

I. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

L'épaisseur relativement faible des éléments à contrôler a conduit à l'adoption de la méthode de contrôle dite « par transmission », dans laquelle on mesure les variations d'absorption subies par un faisceau ultrasonore traversant la plaque.

Dans les dispositifs classiques, on utilise deux traducteurs: un émetteur et un récepteur, placés vis-à-vis, de part et d'autre de la plaqueàcontrôler. Afin d'assurer un couplage acoustique constant, l'ensemble est plongé dans un liquide.

Dans l'appareillage réalisé on a préféré, pour des raisons de simplifications techniques, n'utiliser qu'un seul traducteur-émetteur-récepteur, associé à un réflecteur. L'onde ultrasonore est émise sous forme d'impulsions brèves lesquelles, après avoir frappé le réflecteur, reviennent sur le traducteur. Cette disposition, outre l'avantage de simplicité déjà mentionné, permet d'augmenter la sensibilité de l'ensemble aux variations d'absorption, le faisceau ultrasonore traversant deux fois la plaque au même point.

De nombreuses réflexions parasites prennent naissance dans l'espace traducteur-réflecteur. Celles-ci peuvent être éliminées aisément au moyen de dispositifs sélecteurs électroniques qui ne laissent passer que l'impulsion utile, en mettant à profit les différences de temps de parcours.

Si l'on veut pouvoir mettre en évidence des défauts de faibles dimensions, il est nécessaire que ceux-ci interceptent une partie importante du faisceau ultrasonore qui doit donc avoir, au point où il intercepte la plaque, un diamètre aussi réduit que possible; ce résultat a été obtenu par l'utilisation de traducteurs équipés de coupelles focalisantes travaillant à une fréquence de 10 Mc/s.

Le diamètre utile minimal du faisceau produit est de l'ordre de 1,5 mm, ce qui permet de déceler avec certitude des défauts équivalant à des cercles de 0,5 mm de diamètre. La sensibilité théorique est bien supérieure, mais elle est limitée, dans la pratique, par des fluctuations parasites de l'énergie transmise ayant pour origine l'état de surface de la plaque et du réflecteur, ou la présence de bulles d'air. Le problème posé par la détection de défauts de faibles dimensions peut donc être considéré comme résolu, mais il n'a été envisagé que l'aspect statique de ce problème et, dans l'application pratique qui nous intéresse, des surfaces importantes doivent être explorées dans un temps raisonnable et de façon entièrement automatique. Cette exploration, qui peut se faire par exemple par lignes successives, nécessite l'emploi de dispositifs mécaniques spéciaux dont les caractéristiques doivent être soigneusement étudiées,

Sans entrer dans le détail des calculs théoriques, d'ailleurs fort simples, disons simplement que l'on obtient des résultats très satisfaisants en choisissant un pas d'exploration égal au tiers du diamètre du faisceau ultrasonore au niveau de la plaque, ce diamètre étant défini comme le lieu des points pour lesquels l'intensité ultrasonore a une valeur égale au 1/100 de l'intensité axiale. On est ainsi conduit à adopter un pas d'exploration de l'ordre de 0,5 mm.

Il faut également noter que la cadence à laquelle les impulsions sont émises ne peut guère dépasser 2000 pps, si l'on veut éviter les interférences entre les échos multiples provenant d'émissions successives; de sorte que si l'on veut respecter entre chaque point sonore le même écartement qu'entre les lignes, la vitesse linéaire d'exploration ne devra pas dépasser 0, 5×2000 , soit: 1 m/s.

L'analyse ainsi effectuée est très fine et convient à des travaux de recherche.

Pour des applications industrielles, une telle finesse est parfois superflue et il peut être intéressant de la réduire au profit de la rapidité. C'est ainsi qu'en doublant le diamètre du faisceau, on peut doubler la vitesse linéaire et quadrupler la vitesse superficielle.

II. DISPOSITIF D'EXPLORATION

Afin de conférer à la machine de contrôle une grande souplesse d'utilisation, sa vitesse linéaire maximale a été portée à 3 m/s. Pour obtenir un un fonctionnement régulier et sûr à cette vitesse, un dispositif d'exploration original a été réalisé: les traducteurs, au nombre de six, sont régulièrement disposés à la périphérie d'un disque rotatif. Chaque traducteur est connecté, tous les 1/6 de tour, à l'ensemble émetteur-récepteur électronique. La plaque à contrôler est entraînée sous le disque par des rouleaux; on effectue ainsi une analyse par une série d'arcs de cercles de 60° jointifs.

Le fonctionnement correct du système exige que les différents traducteurs utilisés présentent des caractéristiques aussi voisines que possible, tant en ce qui concerne la sensibilité que le diagramme de rayonnement. Ces conditions ont pu être respectées grâce à une sélection des éléments piézoélectriques complétée par un réseau de correction électrique associé à chaque traducteur.

Des précautions spéciales ont dû être prises pour éviter les parasites pouvant prendre naissance dans le dispositif de commutation. Des résultats satisfaisants ont été obtenus en utilisant six relais sous vide, solidaires du disque rotatif, et dont la fermeture est assurée sur 60° par un électro-aimant fixe muni de pièces polaires de forme convenable. Le contact tournant est assuré par godet de mercure.
III. APPAREILLAGE ÉLECTRONIQUE

L'ensemble électronique, monté dans un meuble à tiroirs amovibles, est relativement classique: il comporte, outre l'émetteur-récepteur et le tube de contrôle, des dispositifs sélecteurs et amplificateurs destinés à fournir les tensions nécessaires au fonctionnement de l'enregistreur. La tension commandant l'inscription est inversement proportionnelle à l'amplitude de l'écho transmis à travers la plaque. Suivant le réglage, cette tension peut varier progressivement ou brutalement, en fonction de l'amplitude de l'écho, ce qui permet d'obtenir des enregistrements plus ou moins contrastés.

Les circuits électroniques ont été étudiés de façon à pouvoir suivre fidèlement les fluctuations les plus rapides de l'amplitude de l'écho transmis.

Ainsi la qualité de l'enregistrement ne dépend pas de la vitesse d'exploration et cette dernière n'est pratiquement limitée que par les performances du dispositif inscripteur et la cadence d'émission.

A la tension d'inscription peut être superposée une tension d'amplitude plus faible, délivrée lorsque l'écho correspondant à la face supérieure de la plaque disparaît.

Il est ainsi possible, sur l'enregistrement, de repérer la position de cetté dernière avec précision.

IV. ENREGISTREUR

L'enregistrement choisi est du type C, c'est-à-dire: le mouvement du style enregistreur reproduit celui du traducteur d'exploration, l'inscription se faisant lorsqu'un défaut est décelé. Pour exploiter toutes les informations fournies par l'ensemble électronique, l'enregistreur doit avoir des caractéristiques assez poussées: constante de temps très faible - de l'ordre de 0, 5 ms-, reproduction correcte des demi-teintes.

L'enregistrement sur papier électrolytique donne de bons résultats, mais son emploi s'avère un peu délicat dans la pratique. La densité d'inscription varie en fonction de la vitesse d'exploration et le papier doit être utilisé dès sa sortie de la bobine débitrice, ce qui exclut pratiquement toute possibilité d'arrêt en cours de sondage. Pour ces raisons, on a préféré recourir à un dispositif d'enregistrement plus « rustique » et tolérant davantage les erreurs de manipulation. Dans ce dispositif très simple, le style d'enregistrement est constitué par une tige de fer doux disposée verticalement, qui peut se déplacer librement dans le noyau d'une bobine recevant le signal d'inscription; une plaque de fer doux fixe est placée sous la tige et, entre les deux, défilent le papier d'enregistrement et une feuille de papier carbone. Lorsque la bobine est excitée, la tige de fer doux s'aimante et vient presser les deux feuilles contre la plaque de fer doux; le papier carbone laisse sur le papier enregistreur une trace d'autant plus foncée que le courant d'excitation est important. Le déplacement vertical du style est pratiquement nul et limité à la course nécessaire à l'écrasement du papier, de sorte que la constante de temps du système est très réduite.

L'enregistreur réalisé suivant cette technique est particulièrement simple et robuste; il comporte six styles d'enregistrement placés à la périphérie d'un disque rotatif synchronisé par le disque d'exploration. Chaque bobinage d'excitation est mis en service tous les 1/6 de tour par un dispositif identique à celui utilisé pour la commutation des traducteurs d'exploration.

L'enregistrement peut être effectué sur un papier quelconque. Le contraste des images peut être réglé très facilement en agissant sur la sensibilité de l'appareillage électronique, ce qui permet, si on le désire, de mettre en évidence de faibles variations d'absorption.

V. DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE

La cuve de contrôle, en acier inoxydable, a une longueur de 5,20 m. Le disque d'exploration et son réflecteur occupent la partie centrale, et la plaque à examiner est entraînée entre les deux par des trains de cylindres moteurs.

Le dispositif de commutation des traducteurs est monté à la partie supérieure de l'arbre d'entraînement du disque. L'ensemble peut être incliné de $\pm 20^{\circ}$ par rapport à l'horizontale afin de permettre le sondage sous incidence oblique.

Le bloc d'enregistrement est monté sur le même bâti, à côté du disque d'exploration et en dehors de la cuve; la synchronisation des deux disques est assurée par chaîne de précision.

Le papier d'enregistrement et le papier carbone sont entraînés sous le disque d'exploration par deux rouleaux presseurs, à une vitesse égale à celle de la plaque contrôlée. L'enregistrement est lisible dès sa sortie et peut être immédiatement utilisé.

Les styles d'inscription sont munis de pointes en carbure de tungstène rapportées et peuvent assurer un service de plusieurs milliers d'heures sans usure appréciable.

Les vitesses de rotation du disque et de déplacement de la plaque peuvent être sélectionnées au moyen de deux boîtes mécaniques à quatre rapports. Il est aussi possible de choisir la combinaison la mieux adaptée aux diamètres des traducteurs utilisés et à la finesse d'analyse désirée.

2 1 4 4

1.1

VI. ENSEMBLE ELECTRONIQUE

Cet ensemble est contenu dans une baie électronique équipée de tiroirs amovibles. Le premier tiroir contient les circuits d'émission et de réception, le tube cathodique de contrôle et les bases de temps.

Le deuxième tiroir contient les sélecteurs, les détecteurs et les amplificateurs d'enregistrement, ainsi que des dispositifs auxiliaires de stabilisation de sensibilité. Le dernier tiroir contient l'alimentation stabilisée générale. Un ventilateur muni d'un filtre assure la climatisation de l'ensemble.

VII. RESULTATS

Une série d'essais a été effectuée sur des éléments colaminés, en utilisant la fréquence de 10 Mc/s et des traducteurs focalisants.





Enregistrement effectué sur un élément colaminé de 1 mm d'épaisseur.



Figure 2

Décollement longitudinal.

Les enregistrements présentés sont affectés d'un léger «flou» dû à un défaut de synchronisme entre les deux disques, défaut qui pourra être éliminé par la suite. Malgré cette imperfection, les tracés sont faciles à interpréter, et, grâce à la finesse du faisceau explorateur et à la faible constante en temps des circuits électroniques et des scripteurs, les défauts détectés sont enregistrés avec une dimension voisine de leur dimension réelle.



Perpendiculaire à D.L. x450

Figure 3

Détection de décollement (micrographie).

La reproduction des demi-teintes permet d'enregistrer simultanément les défauts et la position de l'âme d'uranium.

Sur l'enregistrement présenté à la figure 1, qui a été effectué sur un élément colaminé de 1 mm d'épaisseur, on voit apparaître une série de défauts, dont certains de faibles dimensions. Un examen micrographique des sections de la plaque, au niveau des zones défectueuses, a confirmé les résultats du contrôle ultrasonore.

Sur la figure 2, on voit un défaut correspondant à un décollement longitudinal important; la micrographie correspondante est donnée à la figure 3.

On peut repérer sur les deux enregistrements la fin de l'âme en uranium, qui apparaît en gris clair.

Tous ces essais ont été effectués avec une vitesse linéaire d'exploration de l'ordre de 2 m/s et un pas de 0, 4 mm.

VIII. CONCLUSIONS

Les premiers résultats obtenus dans le contrôle des éléments calaminés sont assez encourageants et peuvent être exploités de façon industrielle.

Le dispositif d'enregistrement utilisé est particulièrement séduisant. Il faut noter qu'il est applicable à d'autres fins que le contrôle d'éléments colaminés. C'est ainsi qu'une importante installation destinée au contrôle de tôles d'alliage léger a été déjà réalisée sur la base du même principe.

Le même dispositif peut permettre des enregistrements bicolores; on utilise dans ce cas deux traducteurs diamétralement opposés, couplés à des circuits électroniques distincts, et, à l'enregistrement, un papier carbone bicolore. En réglant de façon différente chaque voie électronique, on peut différencier par la couleur, de manière précise, des défauts d'importance différente, ce qui peut être intéressant lorsque la dimension du défaut est trop faible pour pouvoir ëtre appreciée sur l'enregistrement.

CONTRÔLE AUTOMATIQUE

DISCUSSION

R.S. SHARPE: We have recently developed a similar rotating disc system at Harwell for the possible high-speed inspection of fuel plates for lack of bond. Have you experienced any difficulty in aligning your six probes and equalizing their outputs?

J. DORY: Yes, each transducer must be tested and its radiation diagram drawn. The sensitivity of each element is also checked. The remaining discrepancies are compensated for by a simple electrical circuit connected to each transducer and by an electronic corrector incorporated in the control panel.

P. KNUDSEN: You state that unbonded areas 0.5 mm in diameter can be detected. Are such defects harmful?

J. DORY: The figures given simply indicate the maximum performance of the equipment. Determination of the threshold of harmfulness of the defect is the responsibility of the user, who must decide in the light of his experience and the intended use of the element. The sensitivity of the equipment may well be too high for production control, but can easily be reduced. In any case, the detection of very small defects may be of interest in research work.

•

ULTRASONIC DETECTION OF LONGITUDINAL DEFECTS IN THIN-WALL CLADDING TUBES

U. NYSTRÖM,

AB ATOMENERGI, STOCKHOLM, SWEDEN

Abstract — Résumé — Аннотация — Resumen

ULTRASONIC DETECTION OF LONGITUDINAL DEFECTS IN THIN-WALL CLADDING TUBES. The maximum permissible length and depth of longitudinal cracks and similar material defects in thin-wall cladding tubes for reactor fuel elements are usually very small. Consequently, very sensitive and reliable testing methods are called for. The ultrasonic method is therefore the most suitable method today of testing cladding tubes for these kinds of defects on a production basis.

This report gives a short general description of the ultrasonic methods and waves that can be for the detection of longitudinal defects in cladding tubes. Results are also given of our current development work. This includes a study of the multiple indications obtained from longitudinal defects in Zircaloy cladding tubes (OD 13.8×0.65 mm) at an incident angle in water of about 36° and using a line-focused transducer with a frequency of 4 MHz.

In certain ultrasonic methods, variations, for instance in the damping of the sound waves in the tube wall and variations in the surface finish and grain size of the tubes can lead to variations in the sensitivity of defect detection. This report contains a description of a method that has been developed, where the sound transmission in the tube wall is controlled simultaneously with the detection of defects. The advantage of this method is that one can always check that the equipment functions during the tests.

The report also lists those factors that limit the maximum speed of rotation and feed that can be used for such tests.

A need exists for a better understanding of the behaviour of sound waves in thin-wall tubes. Standardization of methods and equipment for the detection of defects as well as of technique for making standard defects in tubes is recommended.

DÉTECTION PAR LES ULTRASONS DES DÉFAUTS LONGITUDINAUX DANS LES TUBES DE GAINAGE A PAROI MINCE. Les tolérances pour la longueur et la profondeur maximales des fissures longitudinales et autres défauts analogues dans les tubes de gainage à paroi mince pour les éléments combustibles d'un réacteur sont généralement très étroites. Aussi doit-on utiliser des méthodes de contrôle très sensibles et très fidèles. La méthode par les ultrasons est actuellement la plus appropriée pour le contrôle des tubes de gainage produits industriellement.

L'auteur donne d'abord une description générale succincte des méthodes ultrasonores et indique les ondes que l'on peut utiliser pour la détection des défauts longitudinaux dans les gaines. Il donne également les résultats de travaux de développement récents. Il analyse notamment les nombreuses indications obtenues sur les défauts longitudinaux dans des gaines en Zircaloy (13,8 \times 0,65 mm), sous un angle d'incidence d'environ 36° dans l'eau, en utilisant un traducteur focalisé avec une fréquence de 4 MHz.

Pour certaines méthodes ultrasonores, des variations dans l'amortissement des ondes sonores sur la paroi tubulaire et dans le fini de la surface et la granulométrie des tubes, par exemple, peuvent entraîher des variations de sensibilité dans la détection des défauts. Le mémoire décrit une méthode dans laquelle le contrôle de la transmission des ondes ultrasonores dans la paroi tubulaire a lieu en même temps que la détection des défauts. L'avantage de cette méthode est que l'on peut toujours s'assurer du bon fonctionnement de l'appareil pendant l'essai.

L'auteur indique également les facteurs qui limitent la vitesse maximale de rotation et d'inspection.

Il est encore nécessaire de mieux élucider le comportement des ondes ultrasonores dans les parois tubulaires minces. L'auteur recommande la normalisation des méthodes et du matériel utilisés pour la détection des défauts et l'emploi de techniques uniformes pour provoquer des défauts étalons dans des tubes.

ОБНАРУЖЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ДЕФЕКТОВ В ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБКАХ ПОКРЫТИЯ ПОСРЕДСТВОМ УЛЬТРАЗВУКА. Максимально допустимая длина и глубина продольных трещин и аналогичных дефектов в тонкостенных трубках реакторных топливных элементов обычно являются очень небольшими. Поэтому требуются очень чувствительные и надежные методы испытаний. Ультразвуковой метод является пока наиболее подходящим методом испытания трубок покрытия для обнаружения дефектов такого рода на производственной основе.

Дается краткое общее описание ультразвуковых методов и волн, которые могут использоваться для обнаружения продольных дефектов в трубках покрытия. Приводятся также результаты текущих исследовательских работ. Они включают исследование многочисленных признаков, характерных для продольных дефектов в трубках покрытия из циркаллоя (внешний диаметр 13,8×0,65 мм) при угле наклона в воде около 36° с использованием датчика линейной фокусировки с частотой 4 Мгц.

При некоторых ультразвуковых методах изменения, например в затухании звуковых волн в стенке трубки, и изменения в отделке поверхности и размере зерен трубок могут привести к изменению чувствительности обнаружения дефектов. Дается описание разработанного метода, при котором прохождение звука в стенке трубки контролируется одновременно с обнаружением дефектов. Преимущество этого метода состоит в том, что всегда можно контролировать работу оборудования во время испытаний.

В докладе перечисляются также те факторы, которые ограничивают максимальные скорости вращения и продольного движения, которые можно использовать для таких испытаний.

Необходимо лучше знать поведение звуковых волн в тонкостенных трубках. Рекомендуется стандартизация методов и оборудования для обнаружения дефектов, а также стандартизация способов определения стандартных дефектов в трубках.

LOCALIZACION ULTRASONICA DE DEFECTOS LONGITUDINALES EN TÚBOS DELGADOS PARA REVESTI-MIENTO. La longitud y profundidad máximas admisibles para fisuras longitudinales y defectos materiales análogos en tubos de paredes delgadas destinados al revestimiento de elementos combustibles son por lo común muy pequeñas; por consiguiente, se requieren procedimientos de ensayo muy sensibles y seguros. El método ultrasónico es, por tanto, el más adecuado hoy en día para ensayar tubos de revestimiento a escala industrial, para localizar este tipo de defecto.

La memoria presenta una breve descripción general de los métodos y ondas ultrasónicos que pueden usarse para localizar defectos longitudinales en tubos de revestimiento. Se exponen también resultados de los trabajos actuales de desarrollo. Entre ellos, el estudio de las indicaciones múltiples obtenidas de defectos longitudinales en tubos de Zircaloy para revestimiento (diámetro externo $13,8 \times 0,65$ mm), con un ángulo de incidencia de unos 36° en agua y usando un transductor enfocado a una frecuencia de 4 MHz.

En algunos métodos ultrasónicos las variaciones, por ejemplo del amortiguamiento de las ondas sonoras en la pared del tubo y las variaciones en el acabado superficial y en el tamaño de grano de los tubos, pueden originar cambios en la sensibilidad del método para localizar defectos. La memoria describe un método desarrollado por el autor, en el cual al mismo tiempo que se localizan defectos, se regula la transmisión acústica en la pared del tubo. Este método presenta la ventaja de que siempre es posible verificar el funcionamiento correcto del equipo durante las pruebas.

La memoria enumera también los factores que limitan las velocidades máximas de rotación y de alimentación que pueden usarse en tales ensayos.

Dada la necesidad de conocer más a fondo el comportamiento de las ondas sonoras en los tubos de paredes delgadas, se recomienda normalizar los métodos y equipos empleados para localízar defectos, así como los procedimientos que permitan introducir defectos típicos en los tubos.

1. INTRODUCTION

The maximum permissible length and depth of longitudinal cracks and similar material defects in thin-wall cladding tubes for reactor fuel elements are usually very small. Consequently, very sensitive and reliable testing methods are called for. Therefore, today the ultrasonic method is the most suitable method of testing cladding tubes on a production basis for these kinds of defects. Since 1959, the fuel-element factory at Stockholm has used ultrasonic methods to test relatively large quantities of Zircaloy cladding tubes for fuel elements of the A_b sta reactor etc. The inner diameter of the tested tubes has varied from 12 to 17 mm and the wall thickness from 0.5 to 0.85 mm (ID/t ratio from 19 to 25).

This report gives a short general description of the ultrasonic methods and waves that can be used for detecting longitudinal defects in cladding tubes. Results are also given of our current development work. This includes a study of the multiple indications obtained from longitudinal defects in Zircaloy cladding tubes (OD 13.8×0.65 mm) at an incident angle in water of about 36° and using a line-focused transducer with a frequency of 4 MHz.

In certain ultrasonic methods, e.g. variations in the damping of the sound waves in the tube wall and variations in the surface finish and grain size of the tubes can lead to variations in the sensitivity of defect detection. This report describes a method that has been developed, where the sound transmission in the tube wall is controlled simultaneously with the detection of defects. The advantage of this method is that one can always check that the equipment functions during the tests.

The report also lists those factors that limit the maximum speed of rotation and feed that can be used for such tests.

It may be mentioned that this report deals only with the detection of longitudinal cracks and similar material defects because, in our experience, these are the most common type of defects in Zircaloy cladding tubes.

2. ULTRASONIC WAVES IN THIN MATERIALS

For the ultrasonic testing of thin materials, e.g. sheet or thin-wall cladding tubes, at the frequencies currently used (4-15 MHz), the following wave types can generally be used for detecting detects: (a) Transverse waves, (b) Surface waves and (c) Lamb waves.

2.1. Transverse waves

For the existence of pure transverse waves, the wavelength in the material should be significantly less than its thickness. They are produced and are refracted according to the following well-known formula:

$$\sin \alpha / \sin \beta = V / V_{\rm T} \tag{1}$$

where α is the angle of incidence, β is the angle of refraction, V is the velocity of sound in water and V_T is the velocity of transverse waves in the material.

Table I gives some data on Zircaloy and stainless steel. α_L and α_T are the angles of incidence which give a total reflection of the longitudinal and transverse waves respectively.

U. NYSTRÖM

TABLE I

Material	V _L (m/s)	V _T (m/s)	Tota reflect angle	l ion e	Wave-length for transverse waves			
			αL	α _T	4 MHz (mm)	10 MHz (mm)	15 MHz (mm)	
Zircaloy	4620	2340	19	39	0.:59	0.23	0.16	
Stainless steel	5660	3120	15	28	0.78	0.31	0.21	
Water	1483	 .		,				

VELOCITY OF SOUND, TOTAL REFLECTION ANGLE AND WAVE-LENGTH OF TRANSVERSE WAVES IN ZIRCALOY AND STAINLESS STEEL

2.2. Surface waves

For an angle of incidence which is equal to or somewhat greater than the total reflection angle for transverse waves, surface waves are produced which have the property of having a small penetration depth and are damped rapidly in liquids. Therefore, if possible, this type of wave should therefore be avoided during the testing of tubes where internal and external defects should be detectable with the same sensitivity. With regard to wavelength and material thickness, the same conditions apply as for transverse waves.

2.3. Lamb waves

This type of sound waves, that can only be generated and propagated in thin material, has been comprehensively described in published literature [1-9]. Here it is sufficient to state that there are both symmetric and asymmetric modes of Lamb waves and that their production is dependent on the angle of incidence as well as the product of the material thickness and the frequency of the incident waves. Lamb waves are generated according to the following formula:

$$\sin \alpha = V/V_{\rm P} \tag{2}$$

where α is the angle of incidence in water, V is the velocity of sound in water and V_P is the phase velocity of Lamb waves in the material.

To generate a certain Lamb wave at a given $f \times t$ product, the angle of incidence is so chosen that the phase velocity V_P is equal to the phase velocity of this Lamb wave. See Fig.1.



Fig.1

Symmetrical and asymmetrical modes of Lamb waves in zirconium [5]

It has been shown by Worlton that Lamb waves, the phase velocity of which is equal to the velocity of longitudinal or transverse waves in the material, are damped slightly because mainly horizontal surface vibrations are present in these waves. On the other hand, Lamb waves, where the phase velocity is equal to $\sqrt{2}$ times the transverse velocity, are strongly damped because in this case there are mainly vertical vibrations [5]. This is very important when it comes to the choice of the type of Lamb wave to use for a particular test.

When testing with ultrasonic pulses, which is most common, the group velocity of the Lamb waves, i.e. their velocity of propagation, is significant. This can be calculated from the formula [7]:

$$V_{G} = V_{P} \left[1 - \frac{1}{1 - \frac{V_{P}}{(ft) \frac{dV_{P}}{d(ft)}}} \right]$$

where V_G is the group velocity, V_P is the phase velocity and ft is the product of the frequency and the thickness.

Finally, it should be mentioned that the theories for Lamb waves apply under special conditions that do not normally occur in practice.

3. METHODS OF DETECTING LONGITUDINAL DEFECTS

In principle, the detection of defects in cladding tubes by ultrasonic methods is carried out in the same manner as the ultrasonic testing of thin sheet-metal and welded joints. For these tests, a particular angle of incidence is required, depending upon the type of wave used, as has been mentioned earlier. For detecting longitudinal defects in cladding tubes, this can be achieved simply in the well-known manner shown in Fig. 2, with the transducer placed with a displacement to the side as illustrated.

(3)



Fig.2

Alignment of tube and transducer for detection of longitudinal defects in cladding tubes

The required displacement or the incident angle can be calculated from:

$$\sin \alpha = 2 \cdot a/d \tag{4}$$

where α is the incident angle in water, a is the displacement to the side of transducer and d is the outer diameter of the tube.

For certain reasons it is necessary to limit the dimensions of the incident sound beam. Further, it is important that the intensity of the sound beam is well defined and evenly distributed over the area where it strikes the tube. This is best achieved by the use of line-focused transducers instead of the special reflectors that have been used earlier [11]. Straight circular immersion transducers can easily be focused with the help of Perspex lenses.

In practice, the most suitable angle of incidence is determined experimentally with the help of internal and external standard defects. It is not normally possible to use only external standard defects during this experimental determination of the incident angle because, as a result, the angle may be such that little or no sensitivity may be obtained for internal defects.

When using a transducer which functions as a transmitter and a receiver as in Fig. 2 for the ultrasonic testing of thin-wall tubes with relatively small outer diameters, a higher sensitivity is obtained, in certain cases, for external defects due to direct reflection etc. This can be eliminated by using a separate transmitter and receiver transducer as in the method developed by KRAUTKRAMER in the Federal Republic of Germany [10]. In this case the transmitter transducer is placed in position 1 and the receiver transducer with the same displacement to the side in position 5 (Fig. 2). In this method the sound waves travel approximately one half turn in the tube wall before they strike the defect and are reflected back to the receiver transducer. This transducer can also be placed in the two other possible positions, viz. 3 and 7, and we have found that, in certain cases, position 7 is to be prefered to position 5.

However, by other means we have managed to eliminate the higher sensitivity to external defects due to direct reflection. This has been done by utilizing the multiple indications that are obtained from longitudinal defects in Zircaloy tubes when using methods with a focused transducer as in Fig. 2. An example of such multiple indications is given in Fig. 3.



Fig.3

Multiple indications (II and III) from inside standard defect (depth 10%) in Zircaloy tube OD 13.8 × 0.65 mm. Incident angle 36°. Frequency 4 MHz.

The multiple indications are seen to occur when the sound waves travel one or several turns in the tube wall before they strike the defect and are reflected back to the transducer. This phenomenon has been experimentally studied in detail and an example of the results obtained is given below.

The following equipment was used for the experiment: Instrument: Krautkrämer USIP 10 Transducer: Immersion transducer, Barium Titanate, 10 mm diam., 4 MHz frequency, line-focused, focus 20 mm.

Internal and external standard defects with a depth of 10% of the wall thickness and a length of 4 mm were used in the experiments performed in static conditions. Table II gives the results of an experiment with multiple indications from standard defects in a Zircaloy cladding tube (OD 13.8 \times 0.65 mm). The displacement to the side and thus the angle of incidence was so chosen that maximum amplitude was obtained on the multiple indications. It should be mentioned that, in this way, we have never noticed any difference between displacements for maximum amplitudes from internal and external defects. Moreover, as for most of the time there is good agreement between the depth of the standard defects and the amplitude of the multiple indications, it is probable that only external standard defects, which are easier to manufacture and measure, need to be used from now on for determining the incident angle and the calibration of the equipment.

In the experiment, the amplification was determined to obtain 60% amplitude on the screen from the standard defects. The position of the indication in microseconds on the screen was determined with the aid of an oscilloscope.

Usually the appearance of the multiple indications differs from the first indication in that the pulse is broader. Further, there is always a large difference in amplitude (about 20 db) between the first and the second indica-

U. NYSTRÖM

TABLE II

RESULTS FROM THE DETECTION OF INTERNAL AND EXTERNAL STANDARD (DEPTH 10%, LENGTH 4 mm) IN ZIRCALOY TUBE OD 13.8×0.65 mm. FREQUENCY 4 MHz. ANGLE OF INCIDENCE 36°

Standard defect	Amplification db for 60% ampl.		Diff. (db)		Position (μ s)		Difference (µ s)		Calcula ted velocity (m/s)		
	I *	II *	III *	I-II	II-III	I	Ú	111	I-II	II-III	(II-III)
External	34	53	59	19	6	0	13	24.5	13	11.5	3770
Internal	34	53	58	19	5	2.2	14.5	26.2	12,3	11.7	3700

* Indication number (See Fig. 3)

tion while the difference between the multiple indications is always significantly less (about 4-6 db) (see Table II). From this it looks as if different types of sound waves cause the first indication as well as the multiple indications.

The relatively large angle of incidence, which is always 36-40° in our ultrasonic tests of Zircaloy tubes, for maximum amplitude of the multiple indications is approximately equal to the total reflection angle for transverse waves in Zircaloy (Table I). Because of this and the wave-length at 4 MHz there cannot be any pure transverse waves in the tube wall. The appearance of the pulses and the relatively small difference of amplitude between the multiple indications indicate that these are not caused by surface waves, but possibly by Lamb waves. At a frequency of 4 MHz and a thickness of 0.65 mm (ft product of 2.6 MHz.mm) Lamb waves (1 symm.*) can theoretically be produced in zirconium at an incident angle of 39° (see Fig.1). In this case this type and mode of Lamb wave has a phase velocity approxi-. mately equal to the velocity of transverse waves in Zircaloy and therefore these Lamb waves, according to WORLTON [5], are slightly damped. This agrees with our results.

Moreover, by using a developed method (Section 5), the sound transmission in the tube wall has been plotted as a function of the angle of incidence in water. (See Fig. 4.)

As is seen in the Figure, the transmission is at a maximum for angles of incidence in water of 17° and 36° . This latter angle is identical with the

^{*} symm. = symmetrical



Fig.4

Transmission of sound waves in Zircaloy tube (OD 13.8 \times 0.65 mm) as function of the incident angle in water. Frequency 4 MHz.

angle found in the experimental determination of the most suitable incident angle for standard defects (Table II). Theoretically, a Lamb wave (2 symm.) can also be produced with an incident angle of 17° (Fig. 1). Its phase velocity is approximately the same as the velocity of longitudinal waves and so, as mentioned earlier, this Lamb wave is also slightly damped. It is seen, therefore, that the multiple indications obtained from longitudinal defects in Zircaloy tubes (wall thickness 0.65 mm) at a frequency of 4 MHz and an incident angle of 36° are caused by 1-symm. Lamb waves.

As shown in Table II, there is a time interval $(1.5 \text{ to } 2.2 \,\mu\text{s})$ between indications from internal and external defects. This time interval is always present and the maximum amplitude on the screen of the indications from external standard defects always lie to the left of the indications from internal ones. It has sometimes been able to utilize this fact in tests for the quick localization of detected defects. By using the measured time intervals between the multiple indications, the actual velocity of propagation of the sound waves has been calculated. (See Table II.)

In tests with Lamb waves, it is possible that better results can be obtained with special narrow-frequency band instruments and transducers. For the testing of thin-walled cladding tubes with transverse waves [12] it is necessary to work with high frequencies considering the wave-length and the wall thicknesses that are commonly used. Sometimes this can also call for the production of certain particular Lamb waves at a given thickness. However, we have not been able to carry out any tests or experiments at frequencies higher than 4 MHz because of the marked reduction in sensitivity at the higher frequencies.

4. SENSITIVITY

The minimum size (length and depth) of longitudinal cracks and similar material defects that can be detected by the methods mentioned above are dependent on the following:

- (a) Type of ultrasonic method;
- (b) Structure of the tube material;
- (c) Internal and external surface finish of the tube;
- (d) Wall thickness and outer diameter of the tube;
- (e) Geometry of the defect;
- (f) Type of sound wave, frequency etc.

Because of the numerous factors that affect the sensitivity, it is not possible to give any general figures for the maximum sensitivity that can be obtained in a test. Our experience has shown that a somewhat lower sensitivity is obtained with the methods by using the first multiple indication and separate transmitting and receiving transducers than is obtained with the more conventional method, i.e. using the first indication. This is because of the longer sound path in the first two methods.

However, it can be mentioned that in our ultrasonic testing of Zircaloy cladding tubes (ID 12-17 mm, t* 0.5 - 0.85 mm), the normal practice is to reject tubes with indications of larger amplitude than that obtained from internal and external standard defects with a depth of 5% of the wall thickness and a length of 4 mm. Usually this rejection limit is not, however, the limiting value of the maximum sensitivity that can be obtained in our tests.

On the other hand, in our ultrasonic testing of thin-wall stainless-steel cladding tubes it has not been possible to obtain the same sensitivity, partly because of the larger grain size of the material of these tubes.

Because artificial defects are always used both for determining the incident angle and for adjusting the sensitivity and rejection limit, it is important that the manufacture of these defects is planned in such a way that their length, depth and profile (straight edges) are well defined and reproduceable. At present, standard defects are usually made by some mechanical means, e.g. with the help of a punch [13] or by spark machining [14].

Therefore, today it is very necessary to standardize the manufacturing methods and the measurement of standard defects in tubes. It is also desirable that the same type of standard defects can be used for the running-in and calibration of eddy-current instruments.

5. METHOD OF MEASUREMENT AND CONTROL OF SOUND TRANSMISSION

Varying sensitivity to the detection of longitudinal defects in cladding tubes can be caused by variations in the surface finish, grain size and dimensions (e.g. the variations in wall thickness for certain types of Lamb waves) of the tube as well as by variations in the geometry of the tube relative to the transducer, caused, for instance, by too much clearance between the bushings in the fixture and the tube. When using methods where the sound waves have a relatively long path through the tube wall before they strike a defect and are reflected back to a transducer it is obviously important that the damping of the sound waves in the tube wall does not vary. Otherwise the sensitivity to the detection of defects is not constant.

* t = wall thickness

Moreover, the screen of the ultrasonic apparatus is most often 'clean', except when detecting defects with the multiple indications. As a result, it is not possible, during the tests, to check that the equipment (ultrasonic apparatus, transducer, recorder, water coupling etc.) is always functioning satisfactorily. Usually the equipment and its sensitivity are checked by periodically using it to test a tube with natural or artificial defects during the course of the tests. However, this is no guarantee that the equipment functions all the time as it should. There is also the problem of variations of sensitivity in the tube under test, which cannot be revealed by this procedure. This must therefore be counted as a weakness in the testing method used.

For these reasons we have attached great significance to the control, by some means or other, of the sound transmission in the tube wall during the detection of longitudinal defects. It has been possible to achieve this by placing a receiving transducer in position 2, 4, 6 or 8 with the same displacement to the side as the transmitting transducer in position 1 (Fig. 2). If a transducer (TR) which functions as a transmitter and a receiver are used for defect detection, a receiving transducer (R) can be placed in one of the above-mentioned positions and connected to another ultrasonic apparatus synchronized with the first. By this means the sound transmission and the equipment used for the detection of defects can be controlled at the same time (Fig. 5).



Fig. 5

Method and technique of simultaneous detection of longitudinal defects and control of sound-wave transmission in cladding tubes

If, on the other hand, separate transmitting (T) and receiving (R_1) transducers are used for the detection of defects, the same thing can be achieved by means of an extra receiving transducer (R_2) (see Fig. 6). To separate the transmission and defect indications on the screen, different focal lengths are used on the receiving transducers.

The method developed for the control of the sound transmission has been used for testing thin-walled Zircaloy and stainless-steel cladding tubes. In some cases, the measured sound transmission has been constant while in others both small and large variations have been registered. In one case, the reason for the variations could be traced to a large clearance between the bushings of the fixture and the tubes. As mentioned earlier, because of the fact that there are several factors that can lead to variations in the sound



Fig.6

Method of control of sound-wave transmission when separate transmitter and receiver transducers are used detecting defects

transmission, every case where such variations occur must be treated individually and the particular factors operating must be looked for. An interesting result from the ultrasonic testing of stainless-steel tubes (OD 10.6×0.25 mm) shows this and yet another example of the method's userulness. In this case the tests were carried out as in Fig. 5. In some tubes of a certain alloy, there were significant variations and a marked decrease in the sound transmission. This is illustrated in Fig. 7, which shows a tube with a constant transmission (tube I) and one with a varying and unsatisfactory transmission (tube II).



Sound-wave transmission in stainless-steel tubes OD 10.6 × 0.25 mm

When ultrasonically testing tube II, there were no indications of any defect. Therefore, at first we suspected faults in the equipment. It turned out, however, that the variations and the marked decrease in the sound transmission were caused by carbide precipitation in the grain boundaries on the outer surface of the tube, which thus could only be detected with the help of the transmission indication.

To achieve a constant sensitivity when mainly using those methods where sound waves have a relatively long path through the wall of the tube before they come across defects and are reflected back to the transducer, we are now examining the possibility of introducing an automatic control, by means of a special electronic device, of the amplification of the ultrasonic instrument with the transmission indication, so that if it reduces within a certain margin, the amplification automatically increases in a corresponding manner and vice versa.

6. SCANNING AND TEST SPEEDS

When ultrasonically testing tubes, the necessary scanning along a spiral line can be carried out by several different ways. Irrespective of the manner, and therefore the equipment, that is chosen, the test speed that can be achieved is the product of the feed and the speed of rotation. To be able to test the cladding tubes with the largest possible feed and speed of rotation, it is necessary to know the factors that limit these.

6.1. Speed of rotation

The following factors affect the choice of speed of rotation in the detection of longitudinal defects:

- (a) Type of recorder;
- (b) Pulse frequency;
- (c) Outer diameter of the tube;
- (d) Type of equipment and mechanical stability.

In the tests (see below) the high scanning speeds require a very fast and reliable electronic recording device. As it is most often necessary to produce documentary results of ultrasonic tests on cladding tubes, the results are generally registered on a fast recorder. This is, however, an expensive and relatively complicated form of registration and it is therefore desirable for it to be replaced by some other reliable method of registration.

With increased speeds of rotation, it is necessary to increase the pulse frequency, mainly because the lesser defects would not otherwise be detected in the tests. For this one must determine the amplitude as the function of the speed of rotation for the minimum size of defect to be detected in the tests. Figure 8 shows an example of such a determination.

As is shown in Fig. 8, there is a relatively small range of angles (about 5° to 6°) within which standard defects are detected with almost maximum amplitude. Generally, as two or three pulses ought to strike defects within this range of angles to ensure that this type and size of defect is detected with good reproducibility, the tube should not rotate more than two or three degrees between the pulses. Deeper, natural cracks are usually detected within a larger range of angles because of their geometry. As an example, it can be mentioned that an internal crack (length 2 mm, depth about 15%) in a Zircaloy tube with the same dimensions as the tube in Fig. 8 was detected with almost maximum amplitude within an angular range of about 17°. As stated earlier, it is, however, the angular range for the minimum size of defects to be detected in the tests that determines the number of degrees the tube may rotate between the pulses. In Table III is shown the number of degrees the tube rotates between the pulses for various speeds of rotation and pulse frequencies.



Fig.8. The amplitude of standard defects (depth 5%, length 4mm) in zircalay tube OD 13.8 × 0.65mm as a function of the ratation of the tube, Jacident angle 36°, Frequency 4 MHz.

Fig.8

The amplitude of standard defects (depth 5% length 4 mm) in Zircaloy tube OD 13.8 × 0.65 mm as a function of the rotation of the tube. Incident angle 36°. Frequency 4 MHz.

TABLE III

Rotations (rpm)	Degrees of rotation of tube between the pulses							
	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz				
100	1.2	0.6	0.3	0.15				
250	3	1.5	0.8	0.4				
500	6	3	1.5	0.8				
1000	12	6	3	1.5				
2000	24	12	6	3				
3000	36	18	9	4,5				

PULSE FREQUENCY AND SPEED OF ROTATION

It is seen from this Table that a frequency of 2000 pulses per second should be chosen in the above-mentioned case if the tube is to be tested with a speed of rotation of 1000 rpm.

The scanning speeds (m/s) which are used for the ultrasonic testing of tubes with various speeds of rotation are given in Table IV.

It is seen that scanning speeds are significant at high rotation speeds. This is often overlooked. This, together with the relatively small angular range within which minor defects are usually detected, is the reason why very fast and reliable recording devices are needed.

Finally, other factors that can limit the highest rotation speed that can be used in the tests are the layout and design of the equipment and the measuring instrumentation as well as the length of the tubes.

TABLE IV

OD (mm)	Scanning speed (m/s) Speed of rotation (rpm)								
	100.	250	500	1000	2000	3000			
10	0.05	0.13	0.26	0.52	1.05	1.57			
20	0.10	0.26	0.52	1.05	2.1	3.14			
40	0.21	0,52	1.05	2.1	4,19	6 . 29			

SCANNING SPEEDS FOR ULTRASONIC TESTING OF TUBES

6.2. Choice of feed

When detecting longitudinal defects in cladding tubes, it is the maximum permissible length of such defects which is the deciding factor in the choice of the maximum feed that can be used in the tests. Other important factors affecting this choice are the maximum permissible depth of scratches and the effective length of the incident sound beam. When ultrasonically testing drawn tubes special attention must be paid to the maximum permissible depth of scratches since, in these tubes, scratches are sometimes found which have occurred during the drawing process. However, this is less significant in testing rolled tubes because scratches occur much less often in them.

If the maximum permissible depth of longitudinal cracks and scratches is the same it can be shown that, under certain conditions, the length of the sound beam should be equal to the maximum permissible length (L_s) of the cracks to ensure that scratches with greater length and less depth shall not be detected during the tests. In this case, the maximum feed that can be used will be $0.5 \times L_s$ because scanning should always be carried out along an overlapping spiral line to ensure that all defects are detected. If, on the other hand, the maximum permissible depth of scratches is half the maximum permissible depth of a crack, using the same reasoning, the length of the sound beam can be doubled $(2 \times L_s)$ and the maximum feed is, in this case, $1.5 \times L_{\odot}$, i.e. a three-fold increase. This applies under the conditions where internal and external cracks and scratches are detected with the same sensitivity and where the amplitude of the indications are proportional to their length and depth. It should be pointed out that, by the length of sound beam, is meant its effective length, which for a line-focused circular transducer is usually about half its diameter.

The factors that have been treated here are only those that affect the choice of feed and speed of rotation for the detection of longitudinal defects in cladding tubes. Usually, transverse defects are detected and sometimes even the wall thickness is measured ultrasonically at the same time as the detection of longitudinal defects. Here there are new factors that limit the maximum feed and speed of rotation that can be used in the tests. Some of these are the amplitude as the function of the rotation and axial displacement of the tube during the detection of transverse defects, the scanning frequency and slow response of the electronic equipment used for measuring the wall thickness.

7. SUMMARY

The greatest advantages of using ultrasonic methods in testing thinwalled cladding tubes for defects are their high sensitivity and good reproducibility. However, the test speeds that can be achieved are relatively low because of the small size of the defects that must be detected and also because of the spiral scanning that is necessary. This makes it a rather expensive process. Other disadvantages are that to date it has not been possible to check that the equipment functions as it should during tests and that there can be variations in the sensitivity when using certain methods. It is hoped that this can be remedied by using the method of the control of the sound transmission in the tube wall described in this report.

Today the ultrasonic tests are carried out in many ways, mainly using different frequencies, but also using various transducer arrangements. For the future ultrasonic testing of cladding tubes in a uniform and best possible manner, it is necessary to improve our knowledge of the behaviour of the various types of sound waves in thin-walled tubes. Moreover, it is possible that better uniformity and greater flexibility are required in the ultrasonic apparatus and transducers that are used in the tests.

As internal and external standard defects are most often used in the running-in and calibration of the equipment, it would be very useful to establish norms for the appearance (profile) of the defects and to standardize their methods of manufacture. Finally, in this connection it should be pointed out that in certain cases, as described in this report, it is possible that only external standard defects (which are easier to manufacture and measure) are required for calibration.

ACKNOWLEDGEMENTS

The writer wishes to thank Roland Thörnqvist who has taken part in the development work for many years and who co-operated in achieving the results presented, and Bengt Berglund who carried out the research described in this report.

REFERENCES

- [1] LAMB, H., Proc. Roy. Soc. London 93A (1917) 114-28.
- [2] SCHOCH, A., Ergebn. Ex. Naturwiss 23 (1950) 127-234.
- [3] FIRESTONE, F.A., U.S. Patent 2.536.128, Jan. (1951).
- [4] LEHFELDT, W., Das Industrieblatt, Heft 8 August (1956).
- [5] WORLTON, D.C., HW-60662, June (1959).

ULTRASONIC DETECTION

- [6] BEUAYARD, L., Brit. J. non-destr. Testing 1 (1959) 1,7-11.
- [7] GRIGSBY, T.N., IRE Transactions on Ultrasonic Engineering, UE-8 (1961) 26-33.
- [8] NIKLAS, L., Materialprufung 4 No.1 (1962) 12-20.
- [9] LEHFELDT, W., Materialprüfung 4 No. 9 (1962) 331-37.
- [10] Das Echo, No. 6, Dec. (1960) 67-68.
- [11] OLIVER, R.B., ASTM Special Technical Publication, No. 223 (1958) 62-79.
- [12] HANSTOCK, R.F., Ultrasonics, July-September (1964) 109-19.
- [13] ZEUTSCHEL, M.F., HW-80284, (1963) 7,16.
- [14] BOWMAN, H.J., Metal Progress 82 No.1 (1962) 78-79.

DISCUSSION

P. BONNET: You say that by measuring the speed of sound in a tube you can measure structural changes, for example carbide precipitation at inox grain joints. What percentage variation is obtained?

U. NYSTROM: I am afraid you misunderstood me. Changes in structure are detected by measuring not the velocity, but the transmission of the sound waves in the tube wall. There are however several other factors which can cause variations in transmission. In the case described (Fig. 7, tube II) the transmission indicated on the screen varied from 80% to nearly zero.

J.C. JANSEN: Can you give some details of the mixture of signals (Fig. 6) and of the position of the control echo on the screen? Is this done by variation of the sound path in water?

U. NYSTROM: Yes, the separation of the signals on the screen is achieved by using different sound paths in the water. By using a smaller focus distance for the transducer used for measuring the sound transmission (Fig. 6), the control echo is positioned to the left on the screen and the defect indications to the right. If the transducers are positioned according to Fig. 6, we use 5-10 mm difference in the sound path in the tube wall.

R.S. SHARPE: I am always intrigued by the simplified drawings that show the direction in which the ultrasound waves leave a tube during testing. Have any detailed Schlieren studies been made of the distribution of the sound leaving tubes during the inspection procedures?

U. NYSTRÖM: No, we have not made any Schlieren studies. The reason why I showed the receiving transducer in the positions indicated in the Figures is that these positions are suitable for our types of fixture.

D.C. WORLTON: In this connection I do know that Schlieren observations have been made on waves emanating from a cylindrical surface, and the character of the radiated energy is a complex function of ultrasonic wave frequency, wall thickness and incident beam angle.

•

CONTRÔLE INDUSTRIEL PAR ULTRASONS DES GAINES EN ACIER INOXYDABLE DU RÉACTEUR EL 4

A.C. PROT, H.E. FOULQUIER ET J.P. PEYROT CENTRE D'ÉTUDES NUCLÉAIRES DE SACLAY, FRANCE

Abstract — Résumé — Аннотация — Resumen

INDUSTRIAL ULTRASONIC INSPECTION OF STAINLESS-STEEL CLADDINGS FOR THE EL4 REACTOR. Improved reactor performance requires the use of accurately fabricated and carefully inspected components. One inspection relates to the quality of the cladding tubes, whose mechanical reliability is essential for economic reactor operation. The choice and development of a method is a difficult matter and the authors explain the main factors involved. Once the choice has been made and the method has been developed in the laboratory, two new problems arise:

Adaptation to meet industrial requirements; and

The need to reconcile the quality standards attainable with the manufacturing process at any given stage and the somewhat arbitrarily defined specifications for the finished product. In practice, this involves a statistical study of batches of tubes from various sources and their classification in relation to more or less strict thresholds.

The number of tubes which have to be inspected is much larger than originally expected. This has led to the design of an automatic inspection device geared both to the output rates involved and to the requirements of the type of inspection adopted; the latter are generally mechanical and impose particularly careful product fabrication.

These various characteristics are now embodied in a device whose capacity can already easily meet the requirements of a fuel-element production line.

The potentialities of the device are closely dependent on the characteristics of the inspection equipment used, especially the performances of the electronic part of ultrasonic inspection instruments and of the transducers. This study shows that standard equipment is not very suitable and that immediate thought should be given to special instruments for this type of inspection.

CONTRÔLE INDUSTRIEL PAR ULTRASONS DES GAINES EN ACIER INOXYDABLE DU REACTEUR ELA. L'accroissement des performances des réacteurs nécessite l'utilisation de matériaux finement élaborés et soigneusement contrôlés. L'un des aspects de ce contrôle est celui de la qualité des tubes de gainage utilisés, dont la tenue mécanique est un facteur essentiel de rentabilité du réacteur.

Il s'avère que le choix de la méthode à utiliser et à mettre au point est délicat; le mémoire en donne les éléments essentiels.

Ce choix étant fait, après mise au point en laboratoire, deux nouveaux problèmes se posent:

- la transposition dans le domaine industriel;

- la nécessité de tenir compte de la qualité permise, à un instant déterminé, par les procédés de fabrication, en relation avec les normes de réception définies de manière plus ou moins arbitraire. Ceci se traduit en fait par la nécessité d'une étude statistique sur des lots de tubes de diverses provenances, et leur classement par rapport à des seuils plus ou moins sévères.

On verra que le nombre de tubes à contrôler est très supérieur à celui prévu initialement. Cela conduit à l'étude d'une machine de contrôle automatique, capable de satisfaire à la fois les exigences de cadence et celles propres au type de contrôle choisi: ces demières sont généralement d'ordre mécanique et nécessitent une construction particulièrement soignée.

L'ensemble de ces considérations a conduit à concevoir une machine dont la cadence peut dès maintenant couvrir sans difficulté les besoins d'une chaîne de fabrication d'éléments combustibles.

Les possibilités de cette machine sont étroitement liées aux caractéristiques du matériel de contrôle choisi, en particulier aux performances de l'électronique des appareils de contrôle par ultrasons et à celles des traducteurs utilisés. Il résulte d'ailleurs de cette étude que le matériel standard ne répond que très imparfaitement au problème et que l'on doit envisager dès maintenant un appareillage particulier pour ce type de contrôle.

ПРОМЫШЛЕННЫЙ КОНТРОЛЬ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ТРУБ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ РЕАКТОРА ДЛЯ ЕL4 С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА. Улучшение рабочих характеристик реакторов требует применения тщательно разработанных и строго контролируемых материалов. Одним из аспектов этого контроля является качество используемых покрытий для труб, механическое состояние которых представляет собой существенный фактор рентабельности реакторов. Подтверждается, что выбор метода, который следует применять и разрабатывать, является трудным. Приводятся основные моменты. После того, как в результате лабораторных работ сделан выбор, возникают две новые проблемы:

1) внедрение в промышленность;

2) необходимость учета допустимого качества в определенный момент методами изготовления в связи с установленными более или менее произвольным образом нормами для приема.

Это, в действительности, обуславливается необходимостью в статистическом исследовании комплектов труб различного изготовления и их классификации по отношению к более или менее строгим нормам.

Видно, что количество подлежащих контролю труб значительно превышает первоначально намеченное. Это ведет к изучению автоматического контрольного механизма, способного удовлетворить одновременно и требованиям темпа, и требованиям, вытекающим из выбранного типа контроля: последние обычно сводятся к механическому контролю и нуждаются в особенно тщательно разработанной конструкции.

Совокупность этих соображений привела к разработке устройства, темп работы которого уже сейчас может без труда покрыть потребности всего цикла производства топливных элементов.

Возможности этого устройства тесно связаны с характеристиками подобранного оборудования наведения и контроля, в особенности со свойствами электроники приборов контроля по ультразвуку и со свойствами используемых преобразователей. К тому же из этого исследования явствует, что стандартное оборудование далеко не соответствует проблеме и что уже сейчас следует предусмотреть особое устройство для данного типа контроля.

METODOS ULTRASONICOS PARA CONTROL INDUSTRIAL DE LAS VAINAS DE ACERO INOXIDABLE DEL REACTOR ELA. Las mayores exigencias a que se someten los reactores obligan a utilizar materiales elaborados y controlados con sumo cuidado. Un aspecto de tal control se refiere a la calidad de las vainas empleadas, cuyas propiedades mecánicas ejercen una influencia decisiva sobre la rentabilidad del reactor.

La elección del método a utilizar representa un proceso delicado, cuyas consideraciones fundamentales se exponen en el presente trabajo.

Una vez elegido el método y puesto a punto en el laboratorio, surgen dos nuevos problemas:

Transposición a escala industrial.

Necesidad de tener siempre presente la calidad que puede alcanzarse en la industria, en relación con normas de aceptación definidas de manera más o menos arbitraria. En la práctica, ello obliga a realizar un estudio estadístico sobre partidas de tubos de diversos orígenes y clasificarlos teniendo en cuenta umbrales de aceptación de distintos grados de severidad.

Como se ve en el trabajo, el número de tubos a controlar es muy superior al previsto inicialmente. Este hecho indujo a estudiar una máquina de control automático, capaz de satisfacer al mismo tiempo las exigencias de la cantidad y las propias del tipo de control seleccionado; estas últimas son por lo general de orden mecánico y requieren una construcción especialmente esmerada.

El conjunto de estas consideraciones llevó a concebir una máquina capaz de satisfacer sin dificultad las necesidades de una cadena de fabricación de elementos combustibles.

Las posibilidades de esta máquina están estrechamente ligadas a las características del material de control escogido, sobre todo al rendimiento de los circuitos electrónicos correspondientes a los aparatos de control por métodos ultrasónicos y al de los transductores utilizados. Se deduce del presente estudio, por otra parte, que el material corriente no responde al problema sino de manera muy imperfecta, y que se debe encarar desde ya el proyecto de un aparato especial para este tipo de control.

1. INTRODUCTION

La mise au point d'un élément combustible qui, dans le cas de la filière EL4, est un élément prototype, pose un très grand nombre de problèmes, en particulier celui de la gaine.

Le choix du matériau, les dimensions des tubes de gaines, résultent toujours d'un compromis entre des exigences contradictoires: faible absorption neutronique, bonnes propriétés mécaniques dans des conditions de fonctionnement très sévères: température, cyclage thermique etc.

Il est donc essentiel de s'assurer de la parfaite intégrité du matériau choisi. Ce souci se trahit par un choix judicieux des conditions d'élaboration et de fabrication et par une vérification <u>a posteriori</u> de la qualité du produit fini. Les procédés mis en œuvre doivent donc être non destructifs, qu'il s'agisse de vérifier les dimensions du produit fini ou de s'assurer de son intégrité.

Ce dernier point fait l'objet des contrôles non destructifs proprements dits, auxquels on peut éventuellement associer quelques contrôles dimensionnels.

2. CHOIX DU PROCEDE D'EXAMEN NON DESTRUCTIF DES GAINES

Ce choix est guidé par un certain nombre d'impératifs et résulte d'un compromis qu'il est parfois difficile de réaliser. En effet, au début d'une fabrication nouvelle, les produits ne sont pas nécessairement de bonne qualité. D'autre part, en l'absence de tout essai, il est <u>a priori</u> difficile de définir un critère de rebut. Il est également malaisé de prévoir le type de défaut le plus dangereux et dont la connaissance peut être déterminante. De plus il y a lieu de tenir compte de la cadence du contrôle, de son prix de revient, de sa facilité de mise en œuvre, du personnel qu'il nécessite. En fait, l'idéal serait de pouvoir utiliser conjointement plusieurs techniques pouvant se compléter ou même se recouper. Toutefois, le responsable d'une telle étude est très vite rappelé à la réalité par des considérations plus pratiques:

- délai d'aboutissement des études,
- matériel et personnel disponibles.

C'est ainsi que nous avons été amenés, dans le cas du contrôle des gaines du réacteur EL4, à éliminer les techniques suivantes:

- ressuage,
- endoscopie,
- radiographie,
- courants de Foucault.

Il peut paraître audacieux d'éliminer <u>a priori</u> les méthodes par courants de Foucault dont le principe les rend particulièrement aptes à des cadences rapides et à une automatisation aisée. Cependant, l'étude d'un tel procédé aurait nécessité beaucoup de temps et la réussite semblait plus incertaine.

Restait donc la technique de contrôle par ultrasons, qui seule a été retenue pour l'examen des gaines à la cadence industrielle. Toutefois, ressuage, endoscopie, radiographie ont été utilisés pendant la phase d'étude.

A.C. PROT et al.

3. MISE AU POINT DU PROCÉDÉ DE CONTRÔLE EN LABORATOIRE

Cette mise au point a nécessité un certain nombre de décisions préliminaires. En effet plusieurs paramètres sont à considérer:

- nombre et type de traducteurs, disposition relative,
- fréquence,
- utilisation d'éléments intermédiaires (caches collimateurs etc.),
- vitesse de rotation et pas, en rélation avec les dimensions du défaut minimal décelable et celles des traducteurs utilisés,
- caractéristiques des appareils disponibles sur le marché.

Compte tenu de toutes ces exigences, on imagine sans difficulté le volume de travail nécessaire pour expérimenter chacune des possibilités. Il a donc fallu dès le départ faire un choix dont les éléments ont été la recherche bibliographique [1 à 6] et l'expérience acquise lors d'un contrat préliminaire passé avec une société privée.

C'est ainsi que nous nous sommes limités à une méthode utilisant du matériel standard, avec le minimum de transformation ou d'adaptation. Elle permet:

- la détection des défauts longitudinaux,
- la détection des défauts transversaux,
- éventuellement la mesure des épaisseurs.

Les dimensions des tubes à contrôler sont les suivantes:

longueur L = 454,5 mm matière: acier inoxydable, diamètre intérieur ϕ_i = 11,07 mm, nuance: 347. épaisseur e = 0,4 mm,

3.1. Détection des défauts longitudinaux

Le principe consiste à utiliser un traducteur ultrasonore émetteurrécepteur, dont l'axe acoustique est situé dans un plan de section droite du tube, mais légèrement décalé par rapport à l'axe de ce dernier, de telle sorte que le faisceau ultrasonore attaque le tube sous une certaine incidence (fig. 1). L'exploration s'effectue en hélice par rotation du tube et translation de la cuve-support de traducteurs.

La fréquence choisie correspond à celle pour laquelle la qualité des traducteurs standard à notre disposition offrait le plus de possibilités, soit 4 MHz. La figure 1 représente la disposition relative du tube, du cache nécessaire pour éliminer les réflexions de surface, et d'un traducteur de 4 MHz au titanate de baryum de 10 mm de diamètre.

Une étude plus approfondie de la répartition de l'énergie du faisceau d'ultrasons [7] nous a permis de mieux comprendre le rôle du cache de matière plastique et nous a amené à disposer le traducteur à la limite de son champ proche, de manière à bénéficier de la sensibilité la meilleure et à éviter les inconvénients inhérents à l'utilisation dans la zone de Fresnel. Cette même étude nous a montré l'intérêt des traducteurs rectangulaires qui permettent, pour un pas de contrôle déterminé, une meilleure définition des défauts courts et rend moins aléatoire leur détection (fig. 2).

306

20*







TUBE CONTRÔLE EN HÉLICE



ENREGISTREMENTS

0,1,2,3,4; Positions successives d'un défaut

Figure 2

Influence de la forme du traducteur et du pas.

Des traducteurs de ce type, dont l'intérêt est illustré par des enregistrements (fig. 3), sont actuellement utilisés sur la machine industrielle dont il sera question plus loin.

La figure 4a représente un enregistrement de défauts étalons artificiels extérieurs et intérieurs réalisés par électroérosion. Certains inconvénients résultent de ce procédé d'usinage, dus probablement à l'état de surface obtenu [8].

Les figures 5a, 5b et 6a, 6b sont des exemples types de défauts détectés à l'aide de cette méthode sur des tubes de 3/10 mm.

3.2. Détection des défauts transversaux

Dans ce cas la disposition du traducteur est classique, son axe est situé dans un plan méridien du tube et il est incliné de manière à réaliser une certaine incidence. Pour simplifier l'appareillage et le standardiser, nous avons choisi un traducteur identique à celui utilisé pour la détection des





Palpeur 4 MHz 17x 10mm

Figure 3

Enregistrement avec des palpeurs 4 MHz $\phi = 10$ mm et 17×10 mm.

défauts longitudinaux. De plus ce traducteur peut éventuellement être alimenté en parallèle par le même générateur d'ultrasons. L'incidence choisie correspond au premier mode de vibration antisymétrique en onde de plaque pour l'épaisseur et la fréquence choisies. Il n'est pas nécessaire d'utiliser un cache, la disposition relative du palpeur et du tube évitant toute réflexion directe.

On constate que, dans ce cas, les réglages sont beaucoup moins critiques: du fait de la position du traducteur, une quantité plus importante d'énergie pénètre dans le tube. Aussi la limite de sensibilité a-t-elle pu être augmentée. La figure 4b représente un enregistrement de défauts étalons extérieurs et intérieurs réalisés comme précédemment.



Une remarque cependant s'impose: La technique utilisée a dépendu très étroitement du matériel disponible et des caractéristiques optimales de celui-ci. Il est certain toutefois que

la limite de sensibilité est atteinte et que tout perfectionnement ultérieur nécessitera:

L= 291

е=33µ

Figure 4b Etalon: défauts transversaux.

L=0,58

e₌33µ

L. = 0,54

e= 22µ

6 = 11850 µ²

défaut, limite

choisi

- une étude poussée de la fabrication des traducteurs,

L = 2,82

e ⊭ 23 µi

1=3.

e = 29µ

L= 2,99

e_ 18µ

L - en mm

e_enµ

- une étude simultanée d'une électronique adaptée au problème de contrôle des gaines minces [8].

3.3. Mesure des épaisseurs

De nombreuses solutions peuvent être envisagées: mécaniques, pneumatiques... Il nous a cependant paru intéressant d'utiliser une méthode ultrasonore, susceptible d'un débit identique à celui permis pour la recherche des défauts, et autorisant l'usage de la même machine.

Le procédé classique est celui de la résonance ultrasonore. L'appareil du commerce utilisé par immersion a reçu une seule modification permettant l'inscription sur enregistreur rapide du signal issu du «converter». Une autre difficulté s'est présentée du fait de la cadence de prélèvement de l'appareil utilisé (Vidigage modèle 21) qui est limité à 50 Hz. On constate dès que l'on atteint la vitesse de rotation de 150 t/min, que le nombre







64 db



TACm 2



× 150

GAF 5 (extérieur)

x450

(extérieur) GAF7 défaut NºI

Figure 5

Enregistrement et micrographie de défauts types.

de prélèvements n'est pas suffisant pour définir sans ambiguité la courbe des variations d'épaisseur. Un dispositif de «lissage» permet d'obtenir la courbe enveloppe des prélèvements et ceci jusqu'à la vitesse normalement utilisée qui est voisine de 300 t/min. Le pas étant de 1,5 mm pour une dimension de traducteur de l'ordre de 3 mm, on obtient un recouvrement très suffisant. La figure 7 est l'exemple d'un enregistrement type réalisé. La valeur crête à crête constitue la mesure de l'excentricité. Un étalonnage préalable permet de définir les valeurs limites permises.

ETUDE DE LA QUALITE DES FOURNITURES EN FONCTION D'UN 4. SEUIL DE REBUT CHOISI

Les méthodes de contrôle étant au point, il reste à confronter leurs performances avec la qualité des tubes en provenance de divers fournisseurs.





Rayure d'étirage (extérieur)

Figure 6

Enregistrement et micrographie de défauts types.

Dans ce but nous avons effectué le contrôle de 10% de la présérie en provenance de cinq fabricants de tubes différents. Ces tubes avaient subi un contrôle dimensionnel préalable. Nous avons recherché les défauts longitudinaux et transversaux, les défauts seuils étant ceux indiqués sur les fi-

CONTROLE INDUSTRIEL PAR ULTRASONS

CONTRÔLE SUR TOUTE LA LONGUEUR DU TUBE (filtre avec RC 5ms)



Figure 7

Enregistrement des variations d'épaisseur d'un tube.

gures 4a et 4b. Les tubes ont alors été classés par fournisseur, en plusieurs qualités, de la manière suivante:

Nous avons relevé par tube le nombre de défauts supérieurs, équivalents ou inférieurs aux défauts seuils choisís.

Partant de ces résultats, nous avons défini un indice de qualité qui représente en fait le nombre de défauts supérieurs à un seuil déterminé en longitudinal et en transversal. On obtient ainsi les tableaux I et II.

Cette étude nous a montré qu'un certain nombre de tubes n'étaient pas contrôlables par suite d'un bruit de fond très important, particulièrement en transversal où la sensibilité est plus grande. Ce bruit de fond est lié très directement à la taille des grains et à son homogénéité. Ceci ressort clairement de la comparaison des enregistrements (fig. 8a, 8b) et des histogrammes donnant la répartition des grains sur des échantillons prélevés au hasard (fig. 9a, 9b).

Il semble donc que le choix d'un seuil de rebut se heurte a une realite très tangible, la qualité effectivement possible à un instant donné. Aussi la prochaine étape de notre étude doit-elle porter sur le classement d'un autre lot de tubes en choisissant successivement des seuils de rebut de plus en plus larges. On aura ainsi une idée plus précise du seuil qui permet d'obtenir un rebut d'ensemble qui ne soit pas trop prohibitif.

5. TRANSPOSITION DES RESÚLTATS DE LABORATOIRE A L'ECHELLE INDUSTRIELLE

La cadence de contrôle permise par les dispositifs utilisés en cours de mise au point est nettement insuffisante pour permettre le contrôle d'un

TABLEAU I

Fournisseur	< étalon	≅étalon	> étalon	RL	Q
А	>> 70	12	52	1,56	0
В	27	4	14	0,42	16
с	39	14	33	• 0, 99	5
D	31	1	3	0,09	21
E	74	4	54 35	1,62	8

DÉFAUTS LONGITUDINAUX Surface de l'étalon: $20\,200\,\mu m^2$

- Dans les trois premières colonnes sont indiqués les nombres de défauts relevés sur 50 longueurs de 300 mm.
- R_L indique le rebut probable sur des tubes de 450 mm.
 - $R_L = 0,42$ correspond à un taux de rebut de 42%.
 - $R_{L} > 1$ indique qu'il existe plus d'un défaut par longueur de 450 mm.
- Q facteur de qualité indique le nombre de longueurs de 300 mm sans aucun défaut décelable.
- Les deux valeurs indiquées pour les tubes E correspondent à la suppression éventuelle de fines rayures d'étirage.



Figure 8a

Enregistrement type - Fournisseur A.



Figure 8b Enregistrement type - Fournisseur B.
TABLEAU II

DÉFAUTS TRANSVERSAUX Surface de l'étalon: 11900 mm²

Fournisseur	< étalon	≅ €talon	> étalon	R _T
A				
В	< 0	2	3	0,09
С				
D			2	
E	15	1	3	0,09

 Dans les trois premières colonnes sont indiqués les nombres de défauts relevés sur 50 longueurs de 300 mm.

- R_T indique le rebut probable sur des tubes de 450 mm.

- $R_{T} = 0,09$ correspond à un taux de rebut de 9%.
- Les zones hachurées correspondent à des tubes présentant un bruit de fond trop important, empêchant tout contrôle.





Répartition des grains - Fournisseur A.



Figure 9b Répartition des grains - Fournisseur B.

lot de tubes correspondant à la première charge du réacteur EL4. Il est prévu, compte tenu des rebuts probables, de contrôler 60000 tubes. Il a donc été nécessaire d'étudier et de mettre au point une machine à cadence beaucoup plus élevée. Les bases de notre étude ont été les suivantes:

- cadence compatible avec le planning de fabrication des éléments combustibles,
- nécessité de tenir compte des exigences mécaniques propres aux solutions techniques retenues pour les divers contrôles,
- nécessité d'extrapoler des résultats obtenus en laboratoire,
- nécessité de conserver sur la machine industrielle un certain nombre de performances permettant d'effectuer un contrôle du type laboratoire, en particulier la détermination précise de la position de défauts éventuels pour examen micrographique ultérieur,
- nécessité de prévoir une amélioration ultérieure des techniques de contrôle, dont l'incidence sur les pas et la vitesse de rotation peut être déterminante.

5.1. Description sommaire de la machine (fig. 10)*

Il s'agit d'une machine semi-automatique, en ce sens que l'approvisionnement en tubes se fait par tiroirs clayettes de 30 tubes. Le contrôle de ces 30 tubes peut être effectué de trois manières différentes:



Figure 10 Cuve de contrôle - détail.

5.1.1. Contrôle manuel

Le tube étant mis en place, le contrôle peut être arrêté à tout moment et l'on peut, soit revenir en arrière, soit modifier le pas ou la vitesse de rotation.

5.1.2. Contrôle semi-automatique

Après contrôle de chaque tube la machine doit être remise en marche manuellement.

5.1.3 Contrôle automatique

Un tube ayant été contrôlé et classé bon ou mauvais, le cycle recommence jusqu'à épuisement des 30 tubes de la clayette. L'arrêt est automatique dès que la clayette débitrice est vide. Il en est de même lorsque l'une des clayettes réceptrices (tubes bons ou mauvais) est pleine.

Dans tous les cas, la mise en marche de l'enregistrement est commandé par celui de la phase contrôle à l'intérieur du cycle.

^{*} Voir également la figure 11 du mémoire SM-63/5 (ces comptes rendus).

Un tube étalon qui est à demeure dans la machine peut à tout moment être contrôlé par simple action sur un bouton de commande. Dans ce cas, le contrôle proprement dit s'effectue en position «manuelle». Après dépose du tube étalon, le cycle normal reprend, en automatique si nécessaire.

La vitesse est réglable par l'intermédiaire d'une boîte à commande électromagnétique comportant huit vitesses de rotation de tubes et huit vitesses de translation de la cuve de contrôle, ce qui permet 64 combinaisons.

Un dispositif d'affichage indique le nombre total de tubes contrôlés, le nombre de tubes bons et le nombre de tubes mauvais. Le rebut peut être commandé soit par la mesure d'épaisseur, soit par le contrôle de défauts. Un tableau synoptique indique à chaque instant la phase du cycle de contrôle en cours. Un tableau d'affichage permet de connaître les causes d'arrêt de la machine: clayette distributrice vide, clayettes de réception ou de rebut pleines, manque de pression etc.

5.2. Justification des solutions mécaniques

5.2.1. Le souci majeur a été de conserver les réglages nécessaires au contrôle avec toute leur précision, dans toutes les conditions de travail de la machine, en particulier le positionnement rigoureux d'un tube, qui n'est pas une pièce mécanique, par rapport aux divers traducteurs et au cache. Ceci impose la solution d'un tube en rotation et d'une cuve portetraducteurs en translation. L'inconvénient de cette solution est la limitation de la longueur des tubes. La machine est capable de dimensions allant de 400 à 600 mm.

Le tube est entraîné dans un mouvement de rotation par l'intermédiaire de deux broches synchronisées mécaniquement. La translation de la cuve est assurée par une vis mère et un écrou à circulation de billes monté sur joint holdam, de manière à ne pas introduire de déformation sur le tube.

La cuve comporte un certain nombre de dispositions particulières:

- étanchéité réalisée par joints à lèvres ou joints plats;
- centrage du tube par l'intermédiaire de deux paliers en téflon chargé, montés sur roulements à billes inoxydables;
- prémouillage du tube grâce à deux préchambres remplies d'un mélange adéquat afin d'éviter les inconvénients dus aux gaz retenus dans les microdéfauts de surface;
- utilisation d'eau déminéralisée et dégazée pour prévenir la formation de microbulles empêchant tout contrôle;
- un grand soin a été apporté à la réalisation de la jonction entre le tube et les broches, de manière à éviter l'introduction de bulles d'air dans la cuve et une usure trop rapide des joints.

5.2.2. L'ensemble des séquences d'automaticité, qui comporte les fonctions suivantes:

- présentation du tube à contrôler,
- dépose du tube contrôlé,
- mise entre pointes et serrage du tube à contrôler,
- présentation et dépose du tube étalon,

est réalisé grâce à un dispositif oléo-pneumatique. Ceci permet une bonne précision de positionnement, un réglage des vitesses précis. Le fluide mo-

.

teur est de l'huile, la pression est transmise par l'air comprimé que l'on trouve dans tous les ateliers.

Chaque phase du cycle automatique est commandée par la fin de la phase précédente, ce qui interdit toute fausse manœuvre.

5.2.3. L'ensemble des dispositifs électroniques nécessaires pour assurer le contrôle a été dissocié de la machine proprement dite, car il est susceptible d'évolution rapide.

5.2.4. Un dispositif de marquage de la bande d'enregistrement a été prévu dans le cas d'un travail à pas très faible (positionnement précis d'un défaut); il donne un top à chaque tour de vis mère, chaque demi-tour et^{ϕ} chaque dixième de tour.

Actuellement la durée d'une séquence d'automaticité est de l'ordre de 20 à 25 s. De ce fait, le débit minimal prévu est de l'ordre de 30 tubes à l'heure, compte non tenu de la mise en place des clayettes et de leur remplacement successif.

Cette cadence sera très probablement augmentée, soit par accroissement de la vitesse de rotation du tube, soit par l'augmentation du pas, autorisée par l'utilisation de traducteurs rectangulaires bien adaptés.

6. CONCLUSION

Le contrôle non destructif par ultrasons des gaines en acier inoxydable du réacteur EL4 a fait l'objet d'études et de mises au point qui ont porté tant sur la technique ultrasonore elle-même que sur le développement à l'échelle industriel.

Il en est résulté la mise en service d'une machine à cadence industrielle, dont la conception permettra l'évolution souhaitée de l'électronique et des traducteurs [9] tout en permettant une cadence de contrôle raisonnable, une grande facilité d'emploi et l'utilisation en machine de laboratoire.

Il faut signaler d'autre part que des modifications mineures permettent d'adapter cette machine au contrôle de tubes jusqu'à 15,5 mm de diamètre et de 400 à 600 mm de long.

RÉFÉRENCES

- OLIVER, R. B., McCLUNG, R. W. and WHITE, J. K., Ultrasonic Inspection of Pipe and Tubing, ORNL-2254 (Feb. 15, 1957).
- [2] FARNSWORTH, P. L., OAKES, H. P. and SOCKY, R. B., Quality Evaluation of Zircaloy-2 Sheath Tubing, HW-64, 452 (Sep. 8, 1959).
- [3] FARNSWORTH, P. L. and HAWS, K. M., Fabrication and Evaluation of Zr-2 and Zr-4 Tubing for Use in Cladding Uranium Dioxide and Aluminium-Plutonium Fuel, HW-66. 810 (Oct. 1, 1960).
- [4] SAWYER, W.A., Ultrasonic Testing of Thin Wall Zircaloy Tubing, AECL-1360 (Aug. 1961).
- [5] NELSON, B., NYSTRÖM, U. et al., Production Control of Zircaloy Fuel Cladding, Aktiebolaget Atomenergi, Stockholm (22 Aug. 1961).
- [6] FITCH, C. E., MAY, H. E. and KALE, V. E., Ultrasonic Testing of Zircaloy Sheath Tubing for Fuel Elements, HW-72. 802 (June 1962).

A.C. PROT et al.

- [7] PROT, A. C., MONNIER, P. R. et HUARD, J. J., Etude du champ acoustique de queiques paipeurs à ultrasons, Rapport d'essais CEA TA-42 (1963) (à paraître).
- [8] ZEUTSCHEL, M. F. and NIXON, N. E., Thin Wall Tubing Tests Using Ultrasonic Shear Waves, Part 1, HW-81. 956 (1964).
- [9] PROT. A. C. et MONNIER, P. R., Contrôle par ultrasons des tubes de gaine en acier inoxydable du réacteur EL4, Rapport CEA R 2577 (1964).

320

AUTOMATION OF THE TUBE-THICKNESS MEASUREMENTS USING ULTRASONICS

F. H. WELLS, C. N. DAVEY AND C. SHARPE ELECTRONICS DIVISION, U. K. A. E. A. RESEARCH GROUP, ATOMIC ENERGY RESEARCH ESTABLISHMENT, HARWELL, UNITED KINGDOM

Abstract — Résumé — Аннотация — Resumen

AUTOMATION OF TUBE-THICKNESS MEASUREMENTS USING ULTRASONICS. Two ultrasonic methods tor automatically measuring the wall thickness of thin-walled metal tubing are described and compared for accuracy and measurement rate. These methods are:

(a) A double-probe method using an ultrasonic plane transmitter crystal to irradiate a small area of tube wall and a separate receiving crystal adjusted to receive energy from this same area; the two probes are mounted close to each other. As the transmitter frequency is varied, the receiver output shows an absorption resonance when the ultrasonic wavelength corresponds to twice the tube thickness. The paper describes the electronic circuits used to automatically adjust the frequency to keep the receiver output at minimum. By measuring this frequency a record in digital form of the thickness of the tube may be obtained.

(b) A single-probe method using a focused transmitter probe directing a burst of energy, typically 30 μ s duration of 5 MHz frequency, at normal incidence to the tube wall; the same probe acts as a receiver and electronic circuits are used to select the first reflected pulses. The paper describes how the transmitter frequency is varied automatically over a selected range and how the frequency at which a minimum reflected pulse occurs is selected and measured. This minimum occurs at a wavelength of twice the tube wall thickness so that again a direct digital measurement of thickness is achieved.

AUTOMATISATION DES MESURES DE L'ÉPAISSEUR DES TUBES PAR ULTRASONS. Deux méthodes ultrasonores de mesure automatique des parois de tubes de faible épaisseur sont décrites et comparées du point de vue de la précision et de la vitesse de la mesure. Elles se présentent comme suit:

a) Une méthode à deux traducteurs, dans laquelle on utilise un cristal plan pour envoyer des ultrasons sur un petite surface de la paroi du tube et un cristal ajusté pour capter l'énergie émanant de cette même surface; les deux traducteurs sont montés à proximité l'un de l'autre. En faisant varier la fréquence de l'émetteur, on observe une résonance d'absorption à la sortie du récepteur lorsque la longueur d'onde des ultrasons est égale au double de l'épaisseur du tube. Le mémoire décrit les circuits électroniques utilisés pour régler automatiquement la fréquence en vue de maintenir à une valeur minimale les signaux à la sortie du récepteur. La mesure de cette fréquence permet d'enregistrer les valeurs numériques de l'épaisseur du tube.

b) Une méthode à un seul traducteur, dans laquelle on utilise un émetteur focalisé qui envoie, perpendiculairement à la paroi du tube, une impulsion ayant en général une durée de $30 \ \mu$ s, et une fréquence de 5 MHz; le même traducteur joue le rôle de récepteur et des circuits électroniques permettent d'identifier les premières impulsions réfléchies. Le mémoire décrit comment on fait varier automatiquement la fréquence de l'émetteur dans une gamme déterminée et comment on choisit et mesure la fréquence à laquelle l'impulsion réfléchie a une valeur minimale. Ce minimum se produit lorsque la longueur d'onde est égale au double de l'épaisseur du tube, de sorte que là encore on peut obtenir une mesure numérique directe de l'épaisseur.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ТРУБОК ПОСРЕДСТВОМ УЛЬТРАЗВУКА. Описываются два ультразвуковых метода по автоматическому измерению толщины тонкостенных труб и дается сравнение на точность и быстроту измерения. Этими методами являются:

а) Метод двойного зонда с использованием ультразвукового плоского кристалла-передатчика для облучения небольшой поверхности стенки трубки и отдельного приемного кристалла, приспособленного для приема энергии от этой же самой поверхности; два зонда устанавливаются в непосредственной близости друг от друга. Так как частота передатчика бывает различной, то выходная мощность приобретает резонанс, когда ультразвуковая длина волны соответствует двойной толщине трубки. Описываются электронные схемы для автоматического регулирования частоты, обеспечивающие минимальную выходную мощность приемника. Измеряя эту частоту, можно получить цифровую запись толщины трубки.

б) Метод одного зонда с использованием сфокусированного зонда-датчика, который направляет импульс энергии, имеющий обычно длительность 30 мк/сек и частоту 5 Мгц при падении по нормали на стенку трубки; этот же зонд действует как приемник, и электронные схемы используются для отбора первых отраженных импульсов. Описываются, каким образом автоматически изменяется частота передатчика в пределах определенного диапазона и как отбирается и измеряется частота, при которой возникает минимально отраженный импульс. Этот минимум возникает при длине волны, вдвое превышающей толщину стенки трубки, так что можно произвести прямое цифровое измерение толщины.

MEDICION AUTOMATICA DE ESPESORES DE PARED DE TUBOS, MEDIANTE PROCEDIMIENTOS ULTRA-SONICOS. Se describen en la memoria dos métodos para medir espesores en tubos métálicos de paredes delgadas, y se los compara en cuanto a exactitud y rapidez de medición. Los dos métodos son los siguientes:

a) Empleo de dos sondas, con un cristal transmisor plano destinado a irradiar con frecuencia ultrasónica una pequeña zona de la pared del tubo, más un cristal receptor ajustado para recibir energía de esa misma zona; las dos sondas se instalan muy próximas una de otra. Variando la frecuencia del transmisor, se observa resonancia en la salida del receptor cuando la longitud de onda de la radiación ultracónica corresponde al doble del espesor del tubo. La memoria describe los circuitos electrónicos utilizados para regular automáticamente la frecuencia, a fin de mantener un valor mínimo a la salida del receptor. Por medición de esta frecuencia, puede obtenerse un registro numérico del espesor del tubo.

b) Un segundo método a base de una sola sonda transmisora, enfocada para enviar un impulso de energía -el valor típico es 5 MHz durante 30 μ s- en dirección normal a la pared del tubo; la misma sonda actúa como receptor y se emplean circuitos electrónicos para seleccionar los primeros pulsos reflejados. La memoria describe en detalle el circuito electrónico utilizado para variar automáticamente la frecuencia del transmisor dentro de un intervalo de trabajo determinado, y la manera en que se selecciona y mide la frecuencia a la cual se observa un impulso reflejado de valor mínimo. Este mínimo aparece a una longitud de onda igual al doble del espesor de la pared del tubo, de suerte que también en este caso se logra una indicación numérica directa del espesor.

1. INTRODUCTION

It is now well established that the thickness of a metal plate or tube wall may be measured by ultrasonic methods wher only one side of the metal is accessible. The method developed by RAUDSZUS [5] and AVEYARD [1,2] was a transmitter, focusing sound waves on to the metal surface, in a direction normal to this surface. A resonance effect occurs in the metal when the sound frequency is such that the metal thickness is nearly equal to one or more half wavelengths of the sound propagating in the dilatational mode in the metal. This resonance may be detected by a change of amplitude in the signal returned to a receiver as the frequency is varied through the resonance point as shown in Fig. 1; Aveyard used the same transmitter crystal as a receiver by inhibiting the transmitter drive during the time needed for reception, since the received signal from the metal surface is considerably delayed in time with respect to the transmitted signal. ALDRIDGE [3] has investigated the mode of working of this system and introduced the useful concept that the metal may be regarded as an electrical delay line with loss caused by a scattering mechanism; Fig. 2 shows his equivalent circuit. The received signal is that reflected from the end of the line and Fig.2 shows



Arrangement of ultrasonic micrometer

a typical calculation based on this equivalent circuit which compares quite well in general shape with the experimental results. As Aldridge shows, these effects are modified by the distribution of sound pressure across the metal surface and the delay-line loss mechanism. With the foregoing prin-



Equivalent electrical circuit of ultrasonic system from ALDRIDGE [3]

ciples already established it becomes possible to design an automatic resonance-seeking instrument so that the metal thickness is given as a digital number. This instrument can then form the basis for an automatic tube-inspection system which will scan in fine detail the whole area of a metal surface providing thickness information in digital form. This digital output may then be analysed to present to the inspector a summary of all thickness variations outside the specification limits. Two instruments have been designed for this purpose as detailed in the next paragraph.

2. CONTINUOUS WAVE MICROMETER

The transmitter and receiver were separated in this method [4] and it is not necessary to inhibit the transmitter during reception. The electronic control arrangement is shown in Fig. 3. The ultrasonic transmitter frequency is frequency modulated at a rate of 400 Hz with a frequency deviation somewhat less than the boundaries of the resonance curve; the mean frequency has been initially set to lie within the resonance-absorption peak by using a manual control and the monitoring oscilloscope. The received signal,



Continuous wave micrometer

of the order of 0.5 mV, is then amplified and demodulated giving an output which follows the shape of the resonance curve over the frequency range covered by the frequency modulation. The fundamental 400-Hz component is then filtered and as the mean transmitter frequency is varied over the resonance peak this 400-Hz component varies in amplitude and phase as shown in Fig. 4. Thus, by comparing this waveform with the original transmitter modulation waveform a control voltage may be derived varying from positive, through zero, to negative as the mean transmitter frequency is varied over the peak. This control voltage is then applied to the transmitter frequency so that the mean frequency is shifted towards the resonance peak where it will stay very close to the resonance absorption peak frequency. Under these "frequency locked" conditions the digital frequency meter will register the mean frequency corresponding to the thickness resonance of the metal.



Phase-sensitive detector operation

As the metal surface is scanned by being moved mechanically under the ultrasonic beam, such as a spiral scan of a thin-walled steel tubing, the mean frequency of the transmitter will stay locked to the resonance peak and the frequency meter can provide a complete digital record of the metalthickness variations. In addition the control voltage from the phase-sensitive detector circuit may be used to give a graph of the thickness contour on a pen recorder.

3. GATED TRANSMITTER MICROMETER

In this method only one ultrasonic crystal transducer is used to act as both transmitter and receiver thus permitting the use of normal incidence to the metal surface. The electronic arrangement is given in Fig. 5 with typical received waveforms shown in Fig.6. The transmitter gate is opened for about 30 μ s to drive the transmitted sound wave and then the centre 10 μ s of the returning first echo is selected by the receiver gate, the amplitude of the signal being stored in a memory circuit. In addition, the frequency of each alternate transmitter pulse is displaced from the mean by a small amount of perhaps 10% of the resonance bandwidth as shown in Fig.6. The resultant gated-receiver pulse amplitude will thus vary from pulse to pulse with this frequency shift and the comparator circuit gives a control output voltage proportional to the amplitude difference between these receiver pulses. This control voltage is applied to the transmitter frequency such that the mean frequency is changed to try and achieve zero-control voltage or equality in amplitude between adjacent receiver pulses. This pulse equality will occur when the mean transmitter frequency is at the resonance peak, each alternate transmitter pulse frequency being slightly high and then slightly low.

In addition to the above frequency controls a third slow search sweep is added to vary the frequency gradually over a relatively large preset range in order to find the resonance absorption peak. Having entered this resonance



Gated transmitter micrometer



Typical monitor waveforms of micrometer

the control system "overrides" the sweep and locks on to the correct frequency. This slow-sweep system removes the need for any manual adjustments except for initially presetting the search range to the expected maximum thickness variation of the metal.

As in the previous instrument a digital output may be obtained from a digital frequency meter or the metal thickness contour shown on a graph from a pen recorder.

4. DISPLAY OF THICKNESS IN DIRECT DIGITAL FORM

The digital output from these two micrometers may either take the form of a frequency indication as in a conventional digital frequency meter or else a direct digital display of thickness (proportional to the inverse of the frequency). The latter display is generally more convenient and the electronic logic is shown in Fig. 7 which is a small rearrangement of similar logic included in a frequency meter. The pulse generator is counted for a period determined by the ultrasonic frequency so that Scaler B reading is inversely proportional to frequency and thus directly proportional to thickness. By a suitable choice of the pulse generator and Scaler A division ratio the Scaler B can register directly in any convenient unit of length such as microinches.



Fig. 7 Logic of direct thickness display

As an example, if metal of thickness 0.00918 in resonated at 10 MHz and a period of 10^5 cycles (Scaler A, Fig. 8) was selected for measurement then a pulse generator set at 918 kHz would produce 9180 pulses during this period and Scaler B would register 9180. This number would then indicate the thickness in micro-inches. The pulse-generator frequency would be initially adjusted to the correct value by reference to a known thickness calibration specimen of a similar metal.

In both of these micrometer designs the transmitter frequency is being varied over a small range so that the measurement gives an average effect. Thus, to achieve a true average we must either count for a time long compared to the modulation period or alternatively count only over a whole number of modulation cycles. So far the counting times have been comparatively long so that this effect has been insignificant but if the scanning speed (see para. 5.3) is high then precautions must be taken to achieve a true average frequency or thickness measurement.

5. COMPARISON OF METHODS AND RESULTS

5.1. Ultrasonic geometry

In the first method there are two transducers to be accurately positioned so that their beams impinge at the same point on the metal surface. All experiments so far have used plane ultrasonic transducer crystals of about 1-cm diam. resulting in the area of measurement being about 1.5-mm diam. for a plane surface or $1.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ for a curved surface of 1 cm radius. Measurements so far have been confined to stainless-steel tubing of 0.015-to 0.018-in wall thickness and 0.25-2-in diam.

By comparison the second method is much easier to set up as only one transducer is involved. A focused transducer has been used to give about 0.5-mm-diam. area of measurement on a plane surface and optimum results are obtained with the transducer ultrasonic beam normal to the metal surface.

5.2. Electronics

Both methods are capable of giving the required automatic thickness indication buth the pulsed method requires more electronic logic and is more complex.

5.3. Scanning speed

The fastest rate of scanning the metal specimen is determined by the speed of digital data handling and the rate at which the automatic frequency control voltage can respond in each of the instruments. If it is assumed that the data handling can be as fast as necessary then the maximum rate of change of information is limited by the response time of the control voltage. For the pulsed method this response time cannot be less than about ten times two transmitter pulse periods since this is the time necessary to derive suitable electronic information and to take the necessary action. For the instrument at present designed this minimum response time would be about 6 ms permitting a scanning speed of 150 points per second.

In contrast the double transducer method could be developed to be a much faster instrument since the transmitter is not pulsed and receive information is available continuously. By increasing the 400-Hz modulation frequency it is estimated that it might be possible to scan at the high rate of at least 1500 points per second. It should be realised that these rates are dependent on the measurement accuracy required and if accuracies better than $\pm 5\%$ are needed then the scanning speed must be reduced. However, no experiments have yet been done to determine practical limits of scanning speed.

5.4. Accuracy

Test results have shown that if the relative positions of sample and transducers are fixed then measurements are reproducible to within 0.1%. The measurement is, of course, directly dependant on the velocity of sound in the metal so that any measurement must be relative to a calibration sample of a similar metal of known thickness. Likewise any metallurgical structure effects which cause changes in sound-propagation velocity will directly modify the results.

5.5. Choice of method

The single transducer method using a gated transmitter will be used for most work because of the more convenient setting-up arrangement. However, the potentially faster scanning speed of the double transducer method may prove sufficiently important, in some cases, to make this method essential and if necessary a double holder with preset focused transducers could be developed to simplify the setting-up procedure.

6. CONCLUSION

These thickness-measurement methods are undoubtedly well adapted to routine thickness testing and any increase in electronic complexity occasioned by the automatic control systems should result in a much easier and more accurate inspection system. In particular it is possible to give a direct thickness value displayed as a decimal number without any instrumental calibrations apart from the basic velocity of sound in the metal under test.

Further development can usefully be directed towards very high scanning speeds combined with suitable data-handling systems.

REFERENCES

- [2] AVEYARD, S., "Rapid methods of tube measurement", Atomic Energy Research Establishment, M. 1431 (1964).
- [3] ALDRIDGE, E. E., "An investigation into the mode of working of the ultrasonic micrometer used in thickness measurements of thin walled stainless steel tubing", Atomic Energy Research Establishment, M, 1510 (1965).
- [4] DAVEY, C. N., "Ultrasonic measurement of tube wall thickness", British Patent Application No. 38 692/64.
 [5] RAUDSZUS, O., Swiss Patent No. 287, 903 (1950).

^[1] AVEYARD, S., "Tube wall thickness measurement", British Patent Application No. 5390/62.

• · · ·

NEW METHODS AND FACILITIES FOR THE MEASUREMENT OF PHYSICAL PROPERTIES OF REACTOR COMPONENTS AND IRRADIATED MATERIALS

F. FÖRSTER AND P. MÜLLER INSTITUT DR. FÖRSTER, REUTLINGEN, FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY

Abstract — Résumé — Аннотация — Resumen

NEW METHODS AND FACILITIES FOR THE MEASUREMENT OF PHYSICAL PROPERTIES OF REACTOR COMPONENTS AND IRRADIATED MATERIALS. An instrument for the fully automatic measurement and recording of Young's modulus and the shear modulus and the damping capacity as a function of temperature and time is shown. The measurement of Young's modulus is produced by exciting specimens of various sizes in their natural frequency. The measurement of damping capacity occurs by free decay of the vibration or by the measurement of the half width of the resonance curve. Examples are given for measurements of the recovery after radiation damage and after plastic deformation and for the degree of graphitation. The detection of defects and density variations in graphite bars is proven. Furthermore, a method of investigation of the fastening of UO_2 pellets in thin-walled austenitic tubes is explained. A special oven for the investigation of the elastic and inelastic behaviour of "hot" specimens at temperatures between 20 and 2000°C is shown.

The quality control of non-ferrous metals by means of eddy-current measurement of the electrical conductivity is discussed. An instrument is shown for the contactless measurement of the electrical conductivity of non-ferrous metals. The correlation between the electrical conductivity and the stress-strain behaviour of non-ferrous metals and alloys is explained. Special attention is paid to the measurement of small-size test pieces. A device for remote direct measurement in the "hot" zone of the reactor is shown. The dependence of the electrical conductivity upon the radiation dose is discussed.

An instrument for the measurement of the permeability, the remanence and the coercive force as a function of the mechanical stress and the elastic and plastic strain and of the radiation dose is explained. Measurements of the variation of magnetic properties as a function of elastic stress and plastic deformation are shown. The effects of irradiation on the permeability and the coercive force are discussed.

An instrument is shown for the quick measurement and direct reading of the permeability and stainlesssteel components. The correlation between permeability and \triangle ferrite content is explained. Measurements of the \triangle ferrite percentage across welds in stainless-steel tubes and measurements of the \triangle ferrite precipitations as a function of the plastic strain are discussed (hammer-forging of reactor fuel-elements).

NOUVEAUX PROCÉDÉS ET INSTRUMENTS DE MESURE DES PROPRIÉTÉS PHY SIQUES DES ÉLÉMENTS DE RÉACTEUR ET DES MATIÈRES IRRADIÉES. Les auteurs décrivent un instrument permettant de mesurer et d'enregistrer automatiquement le module de Young, le module de cisaillement et la capacité d'amortissement en fonction de la température et du temps. On mesure le module de Young en excitant des spécimens de diverses dimensions à leur fréquence propre. On mesure la capacité d'amortissement d'après la libre décroissance de la vibration ou la largeur à mi-hauteur de la courbe de résonance. Le mémoire donne des exemples de mesures de la guérison après irradiation et après déformation inélastique, ainsi que des exemples du degré de graphitisation. Les auteurs démontrent que l'on peut détecter des défauts et des variations de densité dans les barres de graphite. Ils expliquent, en outre, une méthode d'étude de la fixation de pastilles d' UO₂ sur des tubes en acier austénitique à parois minces. Ils décrivent un four spécial pour l'étude du comportement élastique ou inélastique de spécimens «chauds » à des températures variant entre 20 et 1000°C.

Les auteurs discutent le contrôle de la qualité de métaux non ferreux par mesure de la conductivité électrique au moyen de courants de Foucault et décrivent un instrument permettant de mesurer sans aucun contact la conductivité électrique de métaux non ferreux. Ils expliquent la corrélation entre la conductivité électrique et l'allongement sous l'effet des contraintes dans le cas de métaux et d'alliages non ferreux. Ils s'attachent particulièrement à la mesure d'échantillons de petites dimensions. Ils décrivent un dispositif pour la mesure directe à distance dans la zone \ll chaude \gg du réacteur. Ils discutent la relation entre la conductivité électrique et la dose d'irradiation.

Les auteurs décrivent un instrument de mesure de la perméabilité, de la rémanence et de la force coercitive en fonction des contraintes mécaniques, de la déformation élastique et inélastique et de la dose d'irradiation. Ils donnent des mesures de la variation des propriétés magnétiques en fonction des contraintes élastiques et de la déformation inélastique. Ils étudient les effets de l'irradiation sur la perméabilité et sur la force coercitive.

Les auteurs décrivent un instrument permettant la mesure rapide et la lecture directe de la perméabilité des éléments en acier inoxydable. Ils expliquent la corrélation entre la perméabilité et la teneur en ferrite Δ . Ils discutent certaines mesures du pourcentage de ferrite Δ dans les soudures de tubes en acier inoxydable ainsi que certaines mesures de précipitation de ferrite Δ en fonction de la déformation inélastique (forgeage à la main d'éléments combustibles pour réacteurs).

НОВЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПО-НЕНТОВ РЕАКТОРА И ОБЛУЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ. Описан прибор для автоматического измерения и регистрации модуля Юнга, модуля сдвига и коэффициента затухания как функции температуры и времени. Измерение модуля Юнга производится с помощью возбужденных образцов различных размеров при их естественной частоте. Измерение коэффициента затухания производится по свободному затуханию колебания или путем измерения полуширины резонансной кривой. Приводятся примеры измерений восстановления после радиационного. повреждения и после пластической деформации, а также примеры степени графитизации. Описываются обнаружение дефектов и колебания плотности графитовых блоков. Кроме того объясняется метод исследования закрепления таблеток из UO₂ в тонкостенных аустенитных трубках. Описывается специальная печь для изучения упругого и неупругого поведения "горячих" образцов при температурах от 20 до 1000°С.

Обсуждается контроль качества цветных металлов путем измерения электропроводности с помощью вихревых токов. Описывается прибор для бесконтактного измерения электропроводности цветных металлов. Объясняется соотношение между электропроводностью и деформацией под напряжением цветных металлов и сплавов. Особое внимание обращается на измерение небольших по размеру образцов. Описывается устройство для дистанционных прямых измерений в "горячей" зоне реактора. Рассматривается зависимость электропроводности от доз облучения.

Описывается прибор для измерения проницаемости, остаточной магнитной индукции и коэрцитивной силы как функции механического напряжения, упругой и пластической деформации и доз облучения. Описываются измерения изменений магнитных свойств как функции упругого напряжения и пластической деформации. Рассматривается влияние облучения на проницаемость и коэрцитивную силу.

Описывается прибор для быстрого измерения и непосредственного определения проницаемости компонентов из нержавеющей стали. Объясняется соотношение между проницаемостью и содержанием Δ феррита. Рассматриваются результаты измерений процентного содержания Δ феррита в сварных швах трубок из нержавеющей стали и измерений осаждения Δ феррита как функции пластической деформации (свободная ковка топливных элементов реактора).

NUEVOS METODOS Y EQUIPOS PARA MEDIR PROPIEDADES FISICAS DE COMPONENTES DE REACTOR Y DE MATERIALES IRRADIADOS. Se describe un intrumento para medir y registrar en forma totalmente automática el módulo de Young, el módulo de corte y la capacidad de amortiguamiento, en función de la temperatura y el tiempo. El módulo de Young se determina excitando muestras de diversos tamaños con sus frecuencias naturales, mientras que la capacidad de amortiguamiento se mide en función de la libre atenuación de la vibración, o bien por la anchura media de la curva de resonancia. Se presentan ejemplos de medidas de la recuperación después de provocar daños por irradiaciones y deformaciones plásticas así como grado de grafitación. Se describe la detección de fallas y variaciones de densidad en barras de grafito. Se explica, además, un método para investigar la retención de pastillas de UO₂ en tubos austeníticos de pared delgada. Se describe un horno especial para estudiar el comportamiento elástico e inelastico de muestras radiactivas a temperaturas comprendidas entre 20 y 1000° C.

Los autores discuten el control de calidad de metales no ferrosos por medida de la conductividad eléctrica aplicando corrientes de Foucault. Se describe un instrumento para medir la conductividad eléctrica de metales no ferrosos sin utilizar elementos en contacto. Se explica la correlación entre la conductividad eléctrica y las características de esfuerzo-deformación de metales y aleaciones no ferrosos. Se presta especial atención a la determinación de estas propiedades en muestras pequeñas. Se describe un dispositivo para medición directa a distancia en la zona radiactiva del reactor. Se examina la relación existente entre conductividad eléctrica y la dosis de radiación.

Se describe un instrumento para medir la permeabilidad, la remanencia y la fuerza coercitiva en función de la solicitación mecánica y la deformación elástica y plástica, como también de la dosis de radiación. Se expone un método para medir la variación de las propiedades magnéticas en función de la solicitación elástica y la deformación plástica. Se discuten los efectos de la irradiación sobre la permeabilidad y la fuerza coercitiva.

Se describe un instrumento para medición rápida e indicación directa de la permeabilidad de componentes de acero inoxidable. Se explica la correlación entre permeabilidad y contenido de \triangle - ferrita. Se exponen las mediciones del porcentaje de \triangle - ferrita en soldaduras practicadas en tubos de acero inoxidable, y de las precipitaciones de \triangle - ferrita en función de la deformación plástica (forjado de los elementos combustibles).

Since the first observations of radiation damage made by Wigner in the early forties the methods of measuring variations in physical properties due to radiation damage have been widely enlarged and completed. Many new principles and instruments have been proposed and realized for this wide scope.

In this paper it is intended to show the possibility of the application of new instruments or of some modified facilities of generally known instruments for this purpose. The possibilities of measuring mechanical, magnetic and electrical properties of the material by means of instruments which are especially adapted to the purpose of these measurements will be discussed.

1. MEASUREMENT OF MECHANICAL PROPERTIES

1.1 Influence of radiation damage on mechanical properties

Among the mechanical properties which undergo radiation damage the Young's modulus, the shear modulus, the Poisson ratio and the damping capacity can be measured very accurately and with a very high resolution. This is mainly true for the moduli. There are instruments which allow the measurement of slightest variations in the moduli up to a resolution of 10^{-7} . From Seitz's theory concerning Frenkel defects, which we assume to be well known, the influence of the number of Frenkel defects on the variations of the elastic properties can be estimated. This was especially done by DIENES et al. [1] who estimated that a concentration of 1% Frenkel defects led to variations of the Young's modulus of about 7% as compared with the undisturbed crystal. Many papers have been published on this item [2] and it was found that not in all cases were the effects as large as expected but, on the contrary, some of the materials appeared to show only extremely small effects if any at all.

Figure 1 shows the curve of the modulus of elasticity and damping of a Cu-crystal as a function of the neutron-radiation dose according to measurements by THOMPSON and HOLMES [3]. For carbon steel one may expect a somewhat smaller dependence of Young's modulus on the radiation dose because of the already larger number of "pinning points" which are present without radiation damage. In any case, there is an unequivocal re-



Fig.1

Young's modulus and damping capacity of copper single crystals as a function of irradiation thme (after Thompson and Holmes)

lationship between the amount of radiation damage and the variation of Young's modulus as compared to the value before radiation.

Thus, for a specific material as, for example, carbon steel, the variation ΔE of the modulus of elasticity is a direct measure of the increase of vacancy-interstitial pairs and additional nucleation points for the formation of more dislocations. In this case the variation ΔE of the modulus of elasticity due to radiation damage is a direct measure (an effect of the first order) of the amount of this radiation damage.

According to Fig.1, the damping capacity of a Cu-single crystal decreases after a radiation dose of 4×10^{12} n/cm² to 1/8; that is, 12.5% of the unirradiated value. Already in 1940 READ [4] pointed out that damping values measured on metallic materials are most likely connected with the mobility of dislocations. LÜCKE and GRANATO [5] point out the special sensitivity of the damping measurement method with respect to dislocation effects.

In general, the damping capacity increases with the ability of the dislocations to follow an external stress by means of migrating.

According to LÜCKE and GRANATO [5], in the case of a dynamic stress, the dislocation lines between two dislocation jogs should oscillate back and forth, similar to a string. The energy thus required expresses itself in an increased damping. Experiments made by FORSTER [6] also support the theory of a considerable increase in damping capacity with increasing mobility of lattice dislocations.

Figure 2 shows the damping of an aluminium body with increasing external stress (flow process) and the damping decrease with recovery. During

334



Fig.2

Variation of damping and stress with time

the slip process the migration of dislocations in the lattice is eased, since occurring barriers are continuously broken during the flow process and can be easily over-run by the migrating dislocation. The decrease in the mobility of dislocations due to radiation damage causes the considerable decrease of damping with increasing radiation dose according to Fig.1. Thus, the damping capacity is a very strucutre-sensitive factor which is related to the mobility, or the hindrance of the mobility, of lattice dislocations. Furthermore, the damping reacts sensitively to the first formation of microcracks in the lattice.

Figure 3 shows, from an unpublished report by Förster, the damping curve with time after the quenching of steel (0.9% C), first from 900°C and then from 1100°C. The steel quenched from 900°C shows a slow damping decrease due to the equalization of internal stresses, but when quenched from 1100°C the steel shows damping which, due to the formation of microcracks with time, increases to 300% of the value which was measured immediately after quenching.

Another example for the indication of the formation of micro-cracks, from a previous paper by FORSTER [7], is illustrated in Fig.4 which shows the enormous increase of damping capacity due to inter-crystalline corrosion of verv shallow depth. The grain boundary decay appearing in intercrystalline corrosion corresponds exactly to the effect of micro-cracks. In both cases oscillation energy is destroyed because of the friction of microcrack surfaces on each other, which increases the mechanical damping. Figure 4 shows the damping results of an AlMg (11% Mg) alloy after it was quenched from 450°C and afterwards annealed to various temperatures. Because of annealing, the quenched alloy can be brought into a state which is sensitive to inter-crystalline corrosion.

h,



Variation of damping with time after quenching



Fig.4

Variation of damping with corrosion time after annealing at various temperatures

1.2 Method for determining the non-destructively measurable mechanical properties

The modulus of elasticity (Young's modulus) is related to the velocity of sound by means of equation (1):

$$v = K_1 \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

(1)

where

- v = velocity of sound,
- K_1 = a constant depending upon the system of units that is employed,
- E = Young's modulus,
- ρ = material density.

Since the density of steel is only very slightly changed due to radiation damage, one can determine the influence of radiation damage on the material (variation of Young's modulus according to Dienes's theory) indirectly by measuring the velocity of sound v by means of an ultrasonic echo method. Furthermore, one can determine the ultrasonic damping by means of the decay curve of the multiple echoes.

However, for the problem in question, the ultrasonic method does not seem to be a suitable solution since, first, the accuracy of the determination of Young's modulus by means of the ultrasonic method is hardly sufficient and secondly, the measurement of the temperature dependence of Young's modulus and the damping capacity involves experimental difficulties.

On the other hand, the method described below determines the modulus of elasticity and the damping capacity up to very high temperatures without difficulty.

In particular, there is the possibility of the differential measurement of the elastic properties of the irradiated sample as compared with an unirradiated sample. Thus, from the general temperature curve of the modulus of elasticity, one can extrapolate extremely accurately an E-modulus effect of secondary order such as, for example, is to be expected when determining the Nil Ductility Transition Temperature.

Some time ago, Förster developed a method for measuring the modulus of elasticity and damping capacity [8,9] which has been widely applied. Since, according to the present state of technology, the determination of the number of oscillations in a given time is the most accurate method of physical measurement, the possibility of determining with extremely high accuracy the natural frequency, which is connected by means of equation (2) to the elastic properties, has become an important method for material research and material testing. From equation (1) follows

$$f_0 = \frac{1}{\ell} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$
 (2)

where f_0 is the natural frequency of a cylindrical rod with the length ℓ and E and ρ as for equation (1).

Equation (2) holds for the longitudinal vibration of the samples. For the torsional vibration of the samples an equation is received which is analogous to equation (2). In this case the shear modulus G replaces the Young's modulus E. For the transversal vibration the formula is somewhat more complicated but still similar to equation (2). The Poisson ratio can be calculated directly from the ratio of the natural frequency in torsional excitation over the natural frequency in longitudinal or transversal excitation.

Below we will discuss a few examples of the application of this method for measuring the modulus of elasticity, the torsional modulus, and the damping capacity which show that the method offers definite possibilities for detecting radiation damage. In Fig.5 an excitation system acts on a sample for the excitation of electro-mechanical oscillations. The excitation system is operated by means of an electrical oscillator with variable frequency (position 1 of the switch S). When the oscillation frequency, transmitted from the excitation system to the sample, approaches the natural frequency f_0 of the sample, the latter oscillates with increasing amplitude. This oscillation amplitude is transmitted to an amplifier unit where the height of the amplitude can be read on a meter. When the sample reaches the highest amplitude, the oscillator frequency equals the natural frequency of the sample. Thus, it is only necessary to determine the frequency at the greatest amplitude of oscillation of the sample by means of an exact frequency-measurement system.



Fig. 5

Block diagram of excitation arrangement in Elastomat

But there is still another possibility of exciting the rod to oscillations; namely, by feed-back self-excitation. For this, the switch S in Fig.5 is moved from position 1 to position 2, thus turning off the oscillator. Now the sample is excited to oscillations by feedback. The amplitude of the selfexcited oscillation is kept constant by means of a control system. If this natural frequency of the sample is now applied to an accurate counting unit, one is able to measure continuously and with very high accuracy the natural frequency as a function of temperature and time. An electronic counter is used for the purpose and indicates, selectively, the number of oscillations in 1, 10, or 100 s. When measuring the number of sample oscillations in 10 s, exactly ten times the value of the natural frequency appears on the electronic counter. The latter works fully automatically so that the natural frequency appears on the counter at periodic intervals.

Several special systems were developed for the excitation of the test rod, which will not be described here, but which enable one to excite the rod to longitudinal or transverse as well as to torsional oscillations, and this electro-mechanical excitation works at temperatures up to 1000°C and down to temperatures of liquid air.

From the natural frequency and the dimensions of the test rod one obtains, by means of the simple equation (2), the absolute value of the modulus of elasticity; from the natural frequency of the torsional oscillations one obtains the torsional modulus.

Figure 6 shows the arrangement for the automatic determination of the damping capacity of the test rod. It is the same as for the measurement of the natural frequency, the only difference being that between the amplifier and the counter an additional gate is provided, which permits only those oscillations from the amplifier to reach the counter whose amplitude is between the value A and the eth part, that is, 0.368 A. From the theory of mechanical damping [8] it is deduced that the number of oscillations, which pass during free attenuation of the test rod between an amplitude A and an amplitude A/e, represents the exact reciprocal of the damping.



Fig.6

Block diagram for automatic determination of damping capacity

For the damping measurement, the rod, as previously described, is excited to oscillations either by means of the oscillator or is self-excited by means of feedback excitation. The switch S is moved from the position 1 or 2 to the position 0 so that the excitation of the rod due to the excitation system is eliminated. The oscillation of the rod attenuates according to an exponential function, as given in Fig.7. The counter begins to count the attenuating oscillation only after the amplitude of the oscillation has decreased from high values to a specific value A and the counter will stop as soon as the amplitude has decreased to 0.368 A. Figure 7 illustrates an attenuating oscillation with $\theta = 1/21$. Thus, the number indicated on the electronic counter is the reciprocal of the mechanical damping. Normally, for metallic material, N lies between 10^5 and 10^2 . By means of this simple method, one can determine the damping of a test rod very quickly and in rapid succession, and an absolute decimal indication of the damping is obtained without the necessity of further processing the data as is required in the damping measurement by the ultrasonic method.

Figure 8 shows the "Elastomat" for measuring the modulus of elasticity, the torsional modulus, and damping capacity with five counter decades for measuring the natural frequency f_0 , and the damping θ . The natural frequency f_0 appears at specific intervals automatically on the counter decade when the feedback excitation (switch S in position 2, Fig.5) is selected.

F. FÖRSTER and P. MÜLLER





Exponential attenuation of oscillation

A steel rod, 6 in long and 0.4 in diam. ($\ell = 15 \text{ cm}$, d = 1 cm), has, at room temperature, a natural frequency f_0 of 16000 cps. If one counts with a measurement period of 1 s, the value of the natural frequency appears in one-second intervals. Since the counter accuracy of digital counters is given as ± 1 cycle, the natural frequency of the test body described above is measured with an accuracy of 1/16000.



Fig. 8 Elastomat 1.015 with five decades, showing holder and support for specimen

340

MEASUREMENT OF PHYSICAL PROPERTIES OF REACTOR COMPONENTS

A special design of the unit described here and shown in Fig.9 permits the measurement method which has been discussed for elastic and non-elastic material properties to be adapted specifically to the project in question. This is achieved by:

- (1) The so-called period-duration measurement;
- (2) Automatic recording of the natural frequency; and especially
- (3) Measuring or recording the ratio of the natural frequency of the test body to the natural frequency of a reference body of the same alloy which is not damaged by radiation.

In contrast to the instrument shown in Fig.8, the apparatus shown in Fig.9 is equipped with seven decades instead of five so that accuracy of the frequency resolution is two decades higher and allows a resolution of variations of the Young's modulus up to 10^{-7} if careful test conditions are maintained.

Figure 10 shows schematically the recording and the period-duration measurement. In the period-duration measurement, time is counted in millionths of a second until the rod carries out 10^4 , 10^5 , or 10^6 oscillations.



Fig. 9

Elastomat 1.018 with seven decades for automatic recording of Young's or the shear modulus, damping capacity and temperature as a function of time



Scheme of recording and period-duration measurement by Elastomat

Thus, it is possible to determine the number of natural oscillations of a test rod excited by means of feedback in second intervals accurately to 10^{-6} .

The last three decimals of the period-duration meter are applied by means of a digital-analogue converter to the compensation recorder for the purpose of recording. Variations of the modulus of elasticity are shown on the recorder with a resolution of 10^{-7} , 10^{-6} , 10^{-5} , or 10^{-4} as desired.

Figure 11 shows a schematic diagram of the frequency ratio meter which indicates, in periodic intervals, the ratio of the test rod to the natural frequency of a comparison (normal) rod.

The measurement principle is as follows:

By means of feedback the test sample is excited in its longitudinal natural frequency. The normal sample is located adjacent to the test sample



Fig. 11 Scheme of frequency ratio meter

in the same temperature field, and is also excited to its natural frequency by means of feedback. After adjustment one obtains, by means of a pulse divider, one pulse each for 10^4 , 10^5 , or 10^6 cycles of the normal sample. This pulse, which originates from the normal sample, opens and closes a gate for counting the periods of the test sample. Thus, the decimal digital counter counts the number of test sample periods which fall into a time interval in which the normal sample achieves 10^4 , 10^5 , or 10^6 cycles.

It can be easily seen that the counter connected to the gate indicates the ratio f_{test}/f_{normal} . The last three decimals of this ratio are applied to the recorder by means of the digital-to-analogue converter. This frequency ratio meter, shown in Fig.12, is of special significance for the problem discussed here.

It can be assumed that a sample of the same carbon steel has practically the same thermo-elastic coefficient with and without radiation damage, that is, it exhibits the same dependence of the modulus of elasticity on the temperature. Thus, it is possible to determine the absolute effect of Young's modulus variation independent of temperature, provided the test sample and the normal sample have the same temperature.



Fig. 12 The frequency ratio meter

By means of a few strokes with a file the length of the test sample and of the normal sample before irradiation can easily be adjusted so that, on the frequency ratio meter (Figs.11 and 12) the ratio $f_{test}/f_{normal} = 1.000000$, is obtained.

By repeating the ratio measurement after a specific dose of radiation one can read directly from the variation of the ratio $f_{test} / normal = 1.000000$ the frequency variation of the test sample in millionths.

From equation (2) equation (3) for small variations of Young's modulus is obtained:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{2} \frac{\Delta E}{E_0} . \tag{3}$$

Thus, the variation with respect to the value 1.000 000, read on the ratio meter, only needs to be doubled to obtain the variation of Young's modulus. This variation of Young's modulus is an accurate measure for the number of Frenkel defects formed in the test body.

It is well known that some of the Frenkel defects experience a recombination at room temperature which lasts for a certain time. Because of the very high sensitivity in measuring the variation in Young's modulus by the method described here, it is possible to observe changes of this modulus after irradiation in order to obtain quantitative information concerning the recombination speed of Frenkel defects at room temperature and to extrapolate the number of Frenkel defects after complete recovery from radiation damage.

The frequency ratio meter has already proved successful for representing extremely small metallurgical effects [10], which normally disappear in the noise level of temperature variations and of the measurement unit.

Figure 13 shows the arrangement into which the test rod is placed. The longitudinal natural frequency is then excited automatically. Various excitation and receiver systems were developed for this method to determine the elastic and non-elastic properties, as shown in the lower portion of Fig.13.

Figure 14 shows the oven with a temperature self-balancing device and an excitation and receiver system for temperatures up to 1000°C.

Figure 15 shows a special test-body holder with magnetic excitation which is applicable from very low (sub-zero) temperatures down to about -200°C.

For the problem in question, a twin-system, as in Fig.15, would be suitable, over which the oven with a temperature self-balancing device is placed.

Below we present several curves which were obtained with the absolute method mentioned previously. These were taken from a large number of curves, some of which have not been published.

Figure 16 shows the temperature dependence of the elasticity modulus and the damping capacity for iron [11] for temperatures up to 1000° C. The transition phenomenon in the temperature dependence of the modulus of elasticity is clearly visible. The maximum damping at approximately 100° C is caused by a resonance phenomenon in the carbon atoms in the lattice.



Fig. 13 Close-up view of specimen support



Fig. 14 Oven for measurements up to 1000°C

Figure 17, taken from an unpublished paper, shows the recovery of Young's modulus (natural frequency) and the damping of soft iron after an elongation of 5%.

Figure 17a shows an original chart obtained from a measurement of recovery of a deformed Armco iron bar. The high resolution, especially of the frequency curve, is evident. The test was made at room temperature.

Figure 18 shows the recovery process of a rod with 0.9% C after quenching from 820°C. This was recorded with the unit shown in Fig.12. During the first 20 min after quenching, and because of the recovery of Young's modulus, the counter passes through 6500 digits; this is approximately five digits per second which automatically characterizes the recovery process.



Fig.15

Special holder for measurement at low temperatures down to 200°C



Variation of Young's modulus for iron, with temperatures up to 1000°C

Figure 20 shows a recording of the natural frequency of a steel rod after a 20% deformation. Because of the recovery process, the tape width of 10 in was passed three times during one hour. In the analogue recording of digital values, the width of the recorder tape can be covered as often as desired.



Fig. 17

Recovery of Young's modulus (natural frequency) of iron in time after 5% stretching



Original chart of recovery measurement at Armco-iron $\frac{\Delta E}{F}$, δ and T as a function of time

Figure 20, which was obtained at 1/10 of the highest sensitivity of the unit, shows the extremely high resolution. Between two neighbouring lines in the ordinate of Fig. 20 there is a frequency variation of 0.00001 of the absolute value.

Arrows, plotted on the curve shown in Fig.1, which represents the dependence of Young's modulus on the neutron dose as measured by Thompson and Holmes, characterize the sensitivity of this recording method.

A variation of Young's modulus of the amount, as shown by the arrow, results with a normal recording sensitivity in covering the 10-in recording width 35 times. Thus, the method described here measures already $1/30\,000$ of variations of Young's modulus indicated by the arrow.



Recovery of Young's modulus (natural frequency) of iron with 9% C after quenching from 820°C

In conclusion, we would like to point out that in various European research laboratories a special design of the method described above for the quantitative measurement of radiation damage on graphite, metallic materials, wood etc. is used. For example, variations of Young's modulus of more than 100% were measured with Forster's Elastomat on more than 400 graphite rods after a certain period in the reactor. For these investigations of the radiation damage on graphite, a special suspension system was developed.

This system is shown in Fig.19. Very small specimens can be measured by means of such a device. The smallest dimensions for graphite specimens are $4 \times 4 \times 40$ mm.

A special oven similar to the unit shown in Fig.14 was designed for the high-temperature measurement of hot specimens. Special care was taken for it to be possible to put the samples in the measurement conditions by means of a manipulator.

To facilitate long-time measurements, as they are very common for measuring recovery processes, a fully automatic instrument has been built which is able to give a fully automatic record of the frequency (i.e. of the



Fig. 19

Special device for the measurement of the natural frequency and damping capacity of very small specimens



Fig. 20

Recorder strip showing the change of Young's modulus during 40 min after a 20% cold deformation

Young's or the shear modulus), of the damping capacity and the temperature of the specimen versus the time. With such an instrument the record chart shown in Fig. 17a was obtained.

In this, the first of three sections, the possibility has been discussed of determining radiation damage by means of an elastic measurement method developed by Förster. In the following sections the possibilities of magnetic and electric measurement methods will be discussed.

2. MAGNETIC PROPERTIES

During recent years a successful attempt has been made to connect the theory of the magnetic hysteresis loop with the effects of natural and artificial crystal lattice defects in metallic material.

Especially with regard to the influence of dislocations, new interpretation possibilities were obtained for the magnetic characteristic factors, namely hysteresis, coercive force, and initial permeability, [12, 13, 14, 15, 16].

Ferro-magnetic material consists of individual, homogeneous, magnetic domains, the so-called Weiss areas, which are separated by so-called Bloch walls. Because of the effect of an external magnetic field, as well as an applied stress, the Bloch wall is subject to movement in the crystal lattice. The magnetic hysteresis loop is decisively influenced by these movement hindrances of the Bloch wall.

The following measurement factors are important for the problem in question:

(1) The initial permeability;

(2) The coercive force; and

(3) Variation of the remanence under the effect of a mechanical stress.

Magnetic saturation, being a structure-insensitive factor according to Smekal, hardly reacts to radiation damage. Only in the special case of stainless steel can the saturation magnetization and the initial permeability be slightly increased by neutron radiation. However, the mechanism of the phenomenon differs from that which occurs for carbon steel.

As is well known, the non-ferro-magnetic, austenitic structure represents an unstable metallurgical state. Because of radiation damage, a small portion of the austenitic structure is converted into the stable ferritic state. Thus, under the influence of radiation, merely the amount of ferromagnetic substance is increased which expresses itself in an increase of the magnetic saturation and the observed increase of the permeability.

With carbon steel, however, one must in any case expect a decrease in the initial permeability and an increase in the coercive force. One can deduce the behaviour of the magnetic properties in cases of neutron radiation from the behaviour of the magnetic properties of iron in which, for example, very fine-grained iron carbide was precipitated by means of various annealing operations.

According to KERSTEN's theory [17, 18] very finely dispersed impurities or heterogeneous precipitates increase the coercive force since they act as movement hindrances for the Bloch walls. The magnetic behaviour of a ferro-magnetic material has a many-fold correlation with mechanical behaviour. When a magnetic field is applied, a ferro-magnetic body will experience dimensional variations, which are expressed in the term "magnetostriction". On the other hand, by means of external mechanical forces, variations of the magnetic state are caused.
MEASUREMENT OF PHYSICAL PROPERTIES OF REACTOR COMPONENTS

In previous publications [19, 20] FÖRSTER has discussed the quantitative determination of internal mechanical stresses according to amount and quality (stresses of the first and second kind) by means of magnetic measurements. He was able to show that the first irreversible variations of the mechanical structure due to yield phenomena and the formation of dislocations can be detected much more sensitively with magnetic measurement methods than with other physical measurement methods.

This preliminary representation would become too involved if we were to discuss here all known interactions between the magnetic and mechanical behaviour of a ferro-magnetic material. It may suffice to point out that numerous such interactions exist which have been interpreted theoretically and which can be proved by means of measurements.

GORDON, SERY and FISCHELL [21] made thorough studies on the effects of radiation damage on the magnetic constants. The effects which must be expected vary very widely according to the material under test. The order of the changes is different for the various constants. For instance, the maximum change in the saturation induction is between 0 and -5% for different materials. This corresponds closely with the above-mentioned opinion of Smekal. In contrast to this, variations of the coercive force up to more than 800% were observed. Table I lists the percentage change in DC magnetic properties observed by Gordon et al. Not only DC measurements, but also AC measurements were made on radiation damage, whereby the AC measurements closely correspond with the above-mentioned DC effects. Figure 22 shows one of the results of SERY and GORDON [22] for measurements of 5-79 Molybdenum Permalloy. The Figure shows the enormous effect which can be observed.

Such measurements involve instruments which can meet two important experimental requirements:

- (1) High-measurement sensitivity and accuracy determining magnetic factors; and
- (2) The possibility of difference measurement in the temperature behaviour of magnetic properties between an irradiated sample and an unirradiated standard sample.

In addition, the coercive force, which is the most important magnetic factor for the problem in question, can be measured non-destructively and -independently of shape by a method developed by Förster. Thus, the possibility of determining radiation damage at various points of the reactor vessel at periodic intervals is given.

The following magnetic measurement methods can be applied to the problem in question:

- (a) Measurement of the variation of the magnetic values on the entire magnetization loop due to radiation damage of the material. Absolute and differential measurement.
- (b) Measurement of the variation of the remanence due to external mechanical stress applied to the sample.
- (c) Measurement of the absolute value and the temperature dependence of the coercive force.
- (d) Measurement with high sensitivity of the difference of the coercive force between an irradiated and an unirradiated sample as a function of

TABLE I

Material	Initial Permeability (1)	Maximum Permeability	Coercive Force	Remanence	Saturation (2) Induction	Loop Rect- angu- larity
3.5% silicon iron	8	1	5.7	0.8	0	0.8
Orthonol	-31	15	-28	-24	-4	-21
5-79 Molyb- denum Permalloy	-93	-93	815	-38	-3.2	-36
2 Vanadium Permendur	2.7	1.7	-2	-0.6	-0.7	0
16 Alfenol	34	15	-8	7.5	-5	13
Nickel ferrite	1.2	1.4	-4.6	-4	-1.7	-2.4
2-81 Molyb- denum Permalloy	-6.8	-3.7			-0.2	

PERCENTAGE CHANGE IN DC MAGNETIC PROPERTIES*

Irradiation to $2.74 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$

(1) μ at B = 20 G (2) B for H = 30 Oe

* Ref. [21]

temperature while suppressing the temperature coefficient of the coercive force.

- (e) Shape-independent coercive force measurement on the reactor vessel itself by means of the magnetic point pole method.
- 2.1 Measurement of the variation of magnetic values on the entire magnetization loop due to radiation damage of the material. Absolute and differential measurement.

Figure 21 shows the screen picture of the Ferrograph, a magnetic measurement unit developed by Förster [23, 24] which permits a quick quantitative determination of the magnetic factors as a function of temperature.



Fig.21

Change in the shape of hysteresis loop after neutron irradiation after Gordon, Fischell and Sery

The Ferrograph is used frequently in most European research and industrial laboratories where magnetic measurements are to be carried out. By means of numerous special coils and accessories, this unit is adapted to many special problems. The magnetic measurement factors are quantitatively indicated below the screen of the unit. Absolute sensitivity factors emerge from the B values on the vertical axis in G/cm and from the H values on the horizontal axis in Oe/cm so that by photographic recording, not only the loop, but also the absolute sensitivity is fixed for quantitative evaluation.

Figure 22 shows the Ferrograph with the hysteresis loop of a sample under test. The scale factors employed for this particular measurement appear on the lower portion of the screen frame.

Figure 23 shows schematically the development with increased sensitivity of the absolute loop picture into the differential picture. Let us assume sample 1 in Fig.22 is the test sample which is subject to neutron radiation in the reactor. Sample 2 is the unirradiated comparison sample which is selected so that, before radiation, samples 1 and 2 show exactly the same hysteresis loop.

In Fig. 23a we have first placed sample 1 in the measurement coil and taken the loop. Then we removed sample 1 and inserted sample 2 in the



Fig. 22 Cathode-ray screen of Ferrograph

same measurement coil. Figure 23a shows the two loops of a test sample and a normal sample, photographed one on top of the other. In Fig.23b the test sample is inserted in the measurement coil and the loop photographed. Then sample 1 was removed from the measurement coil and the unirradiated comparison sample 2 was inserted in the comparison coil. A hysteresis loop of sample 2 with exchanged horizontal field axis was obtained because of the opposite polarization of the comparison coil.

If, simultaneously, sample 1 is inserted in the measurement coil and sample 2 in the comparison coil, one obtains (see Fig. 23c) on the screen the difference of the magnetization of both loops of test and normal sample above the field-strength axis. By varying the amplification factor in the magnetization direction (left sensitivity knob in Fig. 22), this hysteresis difference loop can be amplified by the factors 2, 5, 10, 20, 50, 100, etc., so that variation of the magnetic values over the entire hysteresis loop can be represented with extremely high sensitivity. For example, in Fig. 23d, we have amplified the difference loop from Fig. 22c by the factor 4 in the vertical magnetization direction.

It should be noted that numerous measurement values can be obtained if, during the preliminary investigations, not only the hysteresis loop but the total Raleigh region for a hysteresis loop not completely extending into the saturation region, as shown in Fig. 24, is investigated for its behaviour under radiation damage.

From such readings one can judge with a sufficient degree of safety whether measurement of magnetic properties can solve the problem in question.





Development of the differential picture of irradiated/unirradiated specimen from loops of two unirradiated specimens

2.2 Measurement of the variation of the remanence due to external mechanical stress applied to the sample

According to Kersten's theoretical investigations, a reciprocal relationship exists between the internal mechanical stress in the material and the factor $dI_r/d\sigma$, that is, the variations of the remanent magnetization I_r with the external stress σ . Considering this theory, FORSTER has carried out extensive experimental work [19, 20] for the quantitative determination of internal stress.



Raleigh region of hysteresis loop



Fig. 25 Hysteresis region of hysteresis loop

The measurement method applicable here is derived from the comparison method which was discussed by means of Fig.23. If mechanical stress is applied to the test sample in Fig.23d, one obtains a variation in the hysteresis-difference loop. Figure 25 shows the difference loop for a steel wire and Fig.26 for a nickel wire with step-wise increase of the stress applied to the test sample. The distances of the difference loops in the midvertical (B_r) result in the factor $dI_r/d\sigma$.

This test can also be carried out in a different manner where the very first irreversible variation of the magnetic factors, after the test sample is relieved, can be observed. The magnetic differential method is so sensitive that the appearance of the first irreversible, mechanical phenomena

MEASUREMENT OF PHYSICAL PROPERTIES OF REACTOR COMPONENTS





Hysteresis differential loop of steel wire under step-wise increase of stress

in the lattice far below the stress limit can be detected, which indicates a macroscopic variation of the mechanical behaviour in the conventional mechanical characteristics. Here, the extremely high sensitivity of the magnetic method is used in order to "scan" the behaviour of the dislocations at the pinning points (barriers).

2.3 Measurement of the absolute value and the temperature dependence of the coercive force

We have pointed out previously that the coercive force is of special significance to the problem in question. From theory, one may expect to obtain the influence of radiation damage by measuring the coercive force.

FÖRSTER developed a precision coercive force meter [25, 26, 27] which, is at present the most widely used instrument in research and industrial laboratories for exactly determining the coercive force. It is shown in Fig. 27.

The measurement procedure as shown schematically in Fig. 28 is first to saturate the test sample magnetically. After saturation, the sample exhibits a remanent magnetization. Then an opposing magnetic field is increased until the remanent magnetization reaches the value zero. The zero magnetization is measured by so-called Förster probes which are located astatically outside the magnetization coil. Owing to this arrangement, the measurement of the temperature dependence of the coercive force is possible with high accuracy and in rapid succession. As an example Fig. 29 shows the temperature dependence of the coercive force after annealing to various temperatures.

Thus, the absolute value of the coercive force is measured directly in Oersted units independently of the sample size. A small metal chip yields the same value of coercive force with this unit as does a large portion of the same material (Figs. 27 and 28).

To measure extremely small variations of the coercive force, especially, while simultaneously eliminating the effect of temperature on the absolute value of the coercive force, Förster has developed a differential method which has not yet been published, and which works with a sensitivity higher by several powers of 10 than the absolute method.



Fig. 27

Coercive force meter (Coercimeter)



Fig. 28 Scheme of Coercimeter method

2.4 High sensitivity measurement of the coercive force difference between an irradiated and an unirradiated sample as a function of temperature while suppressing the temperature coefficient of the coercive force

FÖRSTER [28, 29, 30, 31] proved that quantitatively the residual magnetic field of a previously saturated test sample with a small diameter-to-



Fig.29

Variation of coercive force with temperature for hard nickel

length ratio is proportional to the coercive force. The magnetic field measured at the specific distance d from the test body which is produced by the residual magnetization after a previous magnetic saturation therefore determines the coercive force of the test body. Figure 30 shows schematically the assembly upon which is based the method of the extremely sensitive measurement of the coercive force differences with elimination of the temperature influence. Electrical current is applied to two identical coils in series so that the magnetic fields inside the coils are equal but in opposite directions. Therefore, after saturation, the residual magnetizations of the test sample and the standard sample in the two coils are in opposite directions so that they will cancel out at the site of the measurement probe. Before the test sample is irradiated in the reactor, it and the standard sample are briefly magnetized to saturation in the coils (Fig. 30). Then the Förster probe, which measures the magnetic residual field with a resolution of 10^{-5} Oe, is adjusted geometrically between the two coils so that, with the highest measurement sensitivity, the field H = 0 is measured.

2.5 Method for the direct measurement and reading of low permeabilities

Figure 30a illustrates an Oerstedmeter for the extremely sensitive measurement of magnetic DC fields. For such an Oestedmeter a special pick-up for direct reading the permeability of slightly ferro-magnetic specimens has been developed. This pick-up is simply put on the surface of a test piece whereby the permeability and the susceptibility respectively can be read immediately. The wide application of this instrument is to the stainless steels. The amount of ferrite contained in these materials increases not only after cold-working but also after exposure to irradiation [32]. For such measurements the instrument shown in Fig. 30a is very suitable and handy.



Fig.30

Scheme to measure coercive-force differential

2.6 Shape-independent coercive force measurement on the reactor vessel itself by means of the magnetic point-pole method

In 1954 it was proved theoretically [33] that the magnetic residual pole, which is produced after a permanent rod magnet is briefly placed on a ferromagnetic body, is determined in its intensity by the coercive force of the material alone.

Figure 31 shows the probe and magnet arrangement used for determining the coercive force independent of the body shape. By briefly pressing down the spring-loaded magnet, a residual point pole appears on the surface of the vessel whose intensity is directly measured quantitatively by the two Förster probes located in the base of the apparatus. By turning the probes around the point pole, one can further measure the anisotropy of the coercive force in the material. However, this is not of great interest to the problem here. With the test device shown in Fig.31 the coercive force of a large surface can be quickly measured since a single reading takes no longer than 2 s.

An important application, which has a certain relationship to our problem, is shown in Fig.32. Here, the variation of the coercive force over a large steel sheet of Thomas steel is measured. Because of ageing, various amounts of $Fe_4 N$ were precipitated at different points of the steel sheet. Now an amount of 0.01% dissolved nitrogen increases the coercive force by about





Fig.31







Variation of coercive force due to aging in a sheet of Thomas steel

1 Oe. But, if the same amount of nitrogen, due to ageing, is precipitated as Fe_4N , the coercive force will be increased by 2.8 Oe. It is well known that the precipitation of Fe_4N needles during the ageing process decreases the ductility. The sheet (Fig.32) actually showed brittle behaviour during forming on the right half which gave increased values of coercive force, while the left half (Fig.32) with lower H_c values, could be formed satisfactorily. The residual point-pole method represents a good and fast test method for comparison tests on reactor parts.

3. ELECTRICAL PROPERTIES

Normally, the electrical resistance of a metallic material increases with the dose of irradiation due to increasing vacancy formation. The resistance increase for body-centred-cubic metals, such as, e.g., Fe, is greater than for face-centred-cubic metals. But after a resistance increase due to irradiation, a recovery mechanism takes place which again leads to a decrease of the resistance as a function of time. Various recovery mechanisms from the resistance increase take place in various temperature ranges.

However, under certain conditions, a resistance decrease may also occur because of corpuscular bombardment, namely when the recovery due to temperature increase outweighs the influence of the simultaneously produced Frenkel defects. For various alloys, namely copper alloys, such an anomalous resistivity decreases after small neutron doses have been observed.

The main difficulty of the resistivity measurement is the great dependence of the electrical resistance upon the temperature on the one hand, and the sometimes very small effects on the other hand. Thus, many of these measurements were confined to the low-temperature range. In many cases recovery effects are not the main reason for carrying out the measurements in the low-temperature range. As many effects are relatively small, the accuracy in the low-temperature range is higher. In this range most of the investigations on resistivity are carried out with the DC method.

For temperatures between 150 and 500°K an eddy-current method for the direct measurement and reading of the resistivity or conductivity, respectively, has been developed by FORSTER [34]. The method uses the dependence of the eddy-current density upon the electrical conductivity in metallic materials. The measurement is very simple: a probe coil is put on the sample and a knob is turned until the needle of a meter comes to zero. The accuracy of the instrument for absolute measurements is – under laboratory conditions – better than 0.5%. For comparison measurements the resolution is 0.2%. The unit is shown in Fig.33. Among others, it has been widely used for measuring precipitation hardening. Unpublished reports of the authors show a good correspondence between the hardness, yield strength and conductivity of aluminium alloys.

Precipitation mechanism is also induced by neutron irradiation [35], because the diffusion rates are enhanced by the introduction of extra vacancies into the alloy. The range of precipitation measurements is within the range of moderately high or low temperatures [36], that means within the range of the eddy-current instrument.

BRUCH, McHUGH and HOCKENBURY [37] show the change of resistivity of several pure metals after neutron irradiation at 80°C. The effects amount to 23% as shown in Table II. Resistivity effects up to 75% occur at irradiated order-disorder alloys. SIEGEL [38] found a strong increase in the resistivity of Cu Au if it had an ordered superlattice before irradiation, whereas only a 1% increase occurred if the lattice was initially disordered. The results are shown in Fig. 34.

Such measurements are most easily carried out with eddy-current instruments. As they use very small energies, no heating – even of small



Fig.33

Eddy-current instrument for direct measurement and reading of conductivity (resistivity)

TABLE II

CHANGE IN RESISTIVITY OF SEVERAL PURE METALS AFTER NEUTRON IRRADIATION*

Material	Increase in Resistivity	Increase (%)
Cu	017	9.2
Ni	0.24	3.1
Ti	4.3	7.8
. Zr	2.9	6.4
Fe	1.0	9.0
Мо	1.4	23.8

Neutron Dose: $6 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ Irradiation Temperature: 80° C

* Ref. [37]

specimens - can occur. The most important feature is the easy application of such probes not only outside the pile, but also by means of a manipulator in the hole. So, within a wide scope this eddy-current conductivity meter offers new possibilities for easy, fast and accurate measurements.



Fig.34

Resisitivity of Cu, Au as a function of neutron irradiation dose

SUMMARY

New methods, instruments and facilities for measuring irradiation effects on the physical properties of materials are outlined. On the example of a number of well-known radiation damage effects new ways of measuring changes of mechanical, magnetic and electrical properties of irradiated specimens are described.

4 . . [.] .

ł

REFERENCES

- [1] DIENES, G.J., Phys. Rev. <u>86</u> (1952) 228; <u>87</u> (1952) 666.
 NABARRO, F. R. N., Phys. Rev. 87 (1952) 665.
- [2] BILLINGTON, D. S. and CRAWFORD, J. H., Jr., Radiation Damage in Solids, Princeton, Princeton University Press (1961).
- [3] THOMPSON, D.O. and HOLMES, D.K., J. appl. Phys. 27 (1956) 191.
- [4] READ, T.A., AIME 143 (1941) 30; Phys. Rev. 58 (1940) 371.
- [5] LÜCKE, K. and GRANATO, A., Int. Conf. on Dislocations and Mechanical Properties of Crystals, Lake Placid, 1956. New York, John Wiley & Sons (1957) Chap. 5.
- [6] FÖRSTER, F. and BREITFELD, H., A Method for the Measurement of Damping during Forming, Z. Metallk. 30 (1938) 343 (in German).
- [7] FORSTER, F. and SCHNEIDER, A., Measurement of the Damping and the Natural Frequency as an Aid to Corrosion Research, Z. Metallk. 29 (1937) 287 (in German).
- [8] FÖRSTER, F., A New Measurement Method for the Determination of the Modulus of Elasticity and Damping, Z. Metallk. 29 (1937) 109 (in German).
- [9] FÖRSTER, F. and KÖSTER, W., Modulus of Elasticity and Damping as a Function of the Material State, Z. Metallk, 29 (1937) 116 (in German).

- [10] FÖRSTER, F., A Measurement Method for the Resolution of Extremely Small Metallurgical Effects (to be published in Z. Metallk.) (in German).
- [11] KÖSTER, W., Modulus of Elasticity and Damping of Iron and Iron Alloys. Arch. Eisenhuttenw. <u>14</u> (1940/41) 271 (in German).
- [12] KERSTEN, M., Z. angew. Phys. 8 (1956) 313.
- [13] KERSTEN, M. Z. angew. Phys. 8 (1956) 382.
- [14] KERSTEN, M., Z. angew. Phys. 8 (1956) 496.
- [15] DIETZEL, H.D., Z. Phys. 149 (1957) 276.
- [16] Conference on Magnetism and Magnetic Material, Boston, 1956.
- [17] KERSTEN, M., Z. angew. Phys. 7 (1955) 397.
- [18] KERSTEN, M., Foundation and Theory of the Magnetic Hysteresis and the Coercive Force. Leipzig S. Hirzel-Verlag 1943 (In German).
- [19] FORSTER, F. and STAMBKE, K., Magnetic Investigations of Internal Stress. I: The Internal Stress of Nickel Wire during Stretching, Z. Metallk. 33 (1941) 97.
- [20] FÖRSTER, F. and STAMBKE, K., Magnetic Investigations of Internal Stress. II: The Internal Stress of Nickel Wire by Drawing Process, Z. Metallk. 33 (1941) 104.
- [21] GORDON, D. I., SERY, R. S. and FISCHELL, R. E., Nucleonics 16 (1958) 73.
- [22] SERY, R.S. and GORDON, D.I., Buil. Am. Phys. Soc. Series II, 3 (1958) 117.
- [23] FÖRSTER, F., An Instrument for the Rapid Determination of Magnetic Quantities, Z. Metallk. <u>32</u> (1940) 184.
- [24] FÖRSTER, F., A New Electromagnetic Method for Nondestructive Material Testing and for the Measurement of Characteristic Material Factors, Industrieanzeiger 77 (1955) 220 (in German).
- [25] FÖRSTER, F., An Industrial Unit for the Rapid and Exact Measurement of the Coercive Force, Z. Metallk. <u>46</u> (1955) 297 (in German).
- [26] FÖRSTER, F., A Quick and Accurate Measurement of the Coercive Force, Arch. Techn. Messen 1254 (1957) 65 and II 255 (1957) 87.
- [27] FORSTER, F., A Method for the Measurement of D.C. Fields and D.C. Field Differences and its Applications to Nondestructive Testing, J. non-destr. Test. <u>13</u> (1055) 31.
- [28] Nondestructive Testing Handbook, New York, Ronald Press (1959) Section 34.
- [29] FÖRSTER, F., Theoretical and Experimental Foundation of the Electro-Magnetic Quality Sorting of Steel Parts. IV: The residual Field Method, Z. Metallk. 45 (1954) 233.
- [30] FÖRSTER, F., Quality Sorting of Sheet with Magnetic and Electrical Methods, The Magnetic D.C. Field Method, Blech I (1954) 3 (in German).
- [31] FÖRSTER, F., A Method for the Measurement or D.C. Magnetic Fields and Field Differences and its Application to Metallurgical Research and Industry, Z. Metallk. <u>46</u> (1955) 358.
- [32] LEESER, D.O., Materials and Methods 40 (1954) 115.
- [33] FORSTER, F. and ZIZELMANN, G., The Rapid Nondestructive Determination of Sheet Anisotropy with the Residual Point Pole Method, Z. Metallk. <u>45</u> (1954) 245.
- [34] Breitfeld, H., Metall 1/2 (1955) 14.
- [35] MURRAY, G.T. and TAYLOR, W.E., Acta Met. 2 (1954) 52.
- [36] BLEWITT, T.H. and COLTMANN, R.R., Phys. Rev. 85 (1952) 384;
- BLEWITT, T.H. and COLTMANN, F.R., Acta Met. 2 (1954) 549.
- [37] BRUCH, C.A., MCHUGH, W.E. and HOCKENBURY, R.W., J. Metals Oct. (1956) 1362.
- [38] SIEGEL, S., Phys. Rev. 75 (1949) 1823.

.

NEW INSTRUMENTS AND PRINCIPLES FOR THE DIMENSIONAL MEASUREMENT AND MEASUREMENT OF SPACING OF REACTOR COMPONENTS*

P. MÜLLER

INSTITUT DR. FÖRSTER, REUTLINGEN, FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY

Abstract — Résumé — Аннотация — Resumen

NEW INSTRUMENTS AND PRINCIPLES FOR THE DIMENSIONAL MEASUREMENT AND MEASUREMENT OF SPACING OF REACTOR COMPONENTS." The measurement of wall thickness of austenitic and non-ferrous sheets, tubes and containers is presented. Two methods for contactless measurement are discussed: eddycurrent method for measuring the thickness of non-ferrous and austenitic sheets and containers by means of transition coils; eddy-current measurement of the wall thickness of tubes by means of feed-through coils. Suitable instruments and their application are shown. Wall-thickness measurement on non-ferrous reactor assemblies by the "magnetic ball method" is also discussed.

The principle of this new type of measurement is explained, its range of use - especially for spotmeasurements - is discussed, and a practical instrument is described.

Measurement of non-magnetic coatings on magnetic base materials is discussed. The measurement principles (magnetic DC and AC field methods) are explained and instruments for measurement of non-magnetic coatings between 3-µm and 20-mm thickness are shown. The special problem of measurement of stellite deposits on ferritic walls of reactor vessels is discussed.

The measurement of electrically non-conductive coatings on base materials consisting of non-ferrous metals; and the principle of measurement (eddy currents) are explained. An instrument for this purpose is shown and typical examples of measurements are given.

Contactless in-line measurements of physical dimensions of metallic reactor components are given. Various methods for ferrous and non-ferrous metals are explained (magnetic DC and AC field method, eddy-current methods). Instruments and examples for remote measurements of diameter, ovality, distortion etc., of reactor components are described, and methods of measuring the spacing of such components in the "hot" zone of the reactor are shown.

An instrument for recording the surface profile and for direct reading the roughness values ("Rauhtiefe", "Glättungstiefe", CLA value and RMS value) is shown. Typical examples of the use of the instrument for reactor components are discussed. Special attention is given to the possibility of using a small and versatile pick-up by means of manipulators in the "hot" zones and on "hot" materials. The increase of surface roughness with increasing irradiation dose is discussed.

NOUVEAUX INSTRUMENTS ET PROCÉDÉS DE MESURE DES DIMENSIONS ET DE L'ESPACEMENT DES ÉLÉMENTS D'UN RÉACTEUR*. L'auteur présente les problèmes de mesure de l'épaisseur de feuilles et des parois de tubes et récipients en aciers austénitiques ou en métaux non ferreux. Deux méthodes de mesure des épaisseurs sans contact sont discutées: la mesure, par courants de Foucault, de l'épaisseur de feuilles et des parois de récipients en métaux non ferreux ou en aciers austénitiques, au moyen de bobines se déplaçant le long des pièces à examiner: la mesure, par courants de Foucault, de l'épaisseur des parois de tubes, au moyen de bobines dans lesquelles se déplacent les pièces à examiner. L'auteur décrit des instruments appropriés et le mode d'utilisation. Il discute également la mesure de l'épaisseur des parois de parties constitutives de réacteurs, en métaux non ferreux, par la «méthode de la bille magnétique» et explique le principe de ce nouveau type

^{*} Unfortunately, at the time of going to Press the Manuscript of this paper (SM 63/20b) was not available. Those readers who require copies are advised to write to the author direct at the Institute Dr. Förster, Reutlingen, Federal Republic of Germany.

^{*} Au moment de mettre sous presse le manuscrit de ce mémoire (SM-63/20b) manquait. Les lecteurs qui désirent en recevoir des exemplaires sont priés de s'adresser directement à l'auteur, à l'Institut Dr. Förster, Reutlingen (République fédérale d'Allemagne).

de mesure et son domaine d'utilisation – notamment pour les mesures par points; il décrit un instrument approprié.

L'auteur examine la mesure des revêtements non magnétiques de matériaux magnétiques; il explique les principes de mesure (méthodes fondées sur les champs magnétiques des courants continus et des courants alternatifs) et décrit des instruments de mesure de revêtements non magnétiques dont l'épaisseur varie entre 3 µm et 20 mm. Il expose le problème spécial de la mesure des dépôts de stellite sur les parois en aciers ferritiques des cuves de réacteurs. La mesure des revêtements non conducteurs de métaux non ferreux est étudiée. Le mémoire explique le principe de mesure (courants de Foucault). Il décrit un instrument approprié et donne des exemples de mesures typiques,

L'auteur examine également la mesure sans contact, en continu, des dimensions de parties constitutives métalliques de réacteurs et explique diverses méthodes de mesure pour les métaux terreux et non terreux (champs magnétiques des courants continus et des courants alternatifs, courants de Foucault). Il décrit des instruments et donne des exemples de mesure télécommandée du diamètre, de l'ovalisation, de la distorsion, etc., de diverses pièces; il expose des méthodes de mesure de l'espacement des éléments de la zone active du réacteur.

Le mémoire décrit un instrument permettant d'enregistrer le profil de surface et de faire la lecture directe des valeurs de la rugosité (profondeur de rugosité, degré de polissage, direction des irrégularités et valeur quadratique moyenne). Il donne des exemples typiques d'emploi de cet instrument pour les pièces d'un réacteur. L'auteur traite en particulier de la possibilité d'utiliser un petit lecteur polyvalent, à l'aide de manipulateurs, dans les zones actives et pour les matières «chaudes». Il discute l'augmentation de la rugosité de surface en fonction de l'accroissement de l'irradiation.

НОВЫЕ ПРИБОРЫ И ПРИНЦИПЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗМЕРОВ И РАСПОЛОЖЕНИЯ КОМ-ПОНЕНТОВ РЕАКТОРА.* Рассматривается измерение толщины листов и толщины стенок труб и контейнеров из аустенитных и цветных металлов. Обсуждаются два метода бесконтактного измерения толщины стенок: а) метод вихревых токов для измерения толщины листов и контейнеров из цветных и аустенитных металлов с помощью переходных катушек; б) метод вихревых токов для измерения толщины стенок труб с помощью проходных катушек. Описываются пригодные для этого приборы и их применение. Измерение толщины стенок узлов реактора из цветных металлов по "методу магнитного шара". Объясняется принцип этого нового вида измерений, область его применения (особенно для точечных измерений) и описывается применяемый на практике прибор.

Измерение материалов немагнитных покрытий на магнитной основе. Объясняются принципы измерений (методы магнитного поля постоянного тока и переменного тока) и описываются приборы для измерения немагнитных покрытий толщиной от 3 микрон до 20 мм. Особо рассматривается проблема отложения стеллита на ферритных стенках корпусов реакторов.

Измерение покрытий, непроводящих электричество, на материалах из цветных металлов. Объясняется принцип такого измерения (вихревые токи). Описывается прибор для таких измерений и типичные примеры измерений.

Приводятся бесконтактные технологические измерения физических размеров металлических компонентов реактора. Объясняются различные методы измерения черных и цветных металлов (метод магнитного поля постоянного тока и переменного тока, методы вихревых токов). Описываются приборы и примеры дистанционного измерения диаметра овальности, искажения и т.д. компонентов реактора. Описываются методы определения расположения таких компонентов в "горячей" зоне реактора.

Описывается прибор для регистрации профиля поверхности и непосредственного определения характера неровности ("Rauhtiefe", "Glåttungstiefe", GLA value и RMS value). Рассматриваются типичные примеры использования этого прибора определения неровностей компонентов реактора. Особое внимание уделяется возможности использования небольшого универсального датчика в "горячих" зонах и "горячих" материалах. Рассматривается вопрос об увеличении неровностей поверхности при увеличении доз облучения.

^{*} К сожалению, в момент направления в печать невозможно было получить рукопись этого документа (SM 63/20b). Тем читателям, которые хотели бы получить копии, советуем написать авторам непосредственно в Институт д-ра Ферстера, Ройтлинген, ФРГ.

NUEVOS INSTRUMENTOS Y PRINCIPIOS PARA MEDIR LAS DIMENSIONES Y LA SEPARACION ENTRE COMPONENTES DE REACTOR*. El autor presenta los problemas de medición del espesor de hojas y de paredes de tubos y recipientes de material austenítico y no ferroso. Se exponen dos métodos para medir el espesor de paredes sin usar elementos en contacto con las mismas: el método de las corrientes de Foucault para medir el espesor de hojas y recipientes de material no ferroso y austenítico, empleando bobinas de transición, y el empleo de corrientes de Foucault para medir espesores de pared en tubos mediante bobinas anulares extensivas. Se describen los instrumentos adecuados y sus aplicaciones. El autor discute además la medición de espesores de pared en componentes no ferrosos para reactores mediante el «método de la esfera magnética» y explica el principio de este nuevo procedimiento de medición, se analiza su alcance, sobre todo para mediciones localizadas, y se describe un instrumento utilizado en la práctica.

Se examina la medición de recubrimientos no magnéticos aplicados sobre materiales magnéticos, se explican los principios de la medición (métodos de campo magnético con corriente continua y alterna) y se describen instrumentos para medir recubrimientos no magnéticos de espesor comprendido entre 3 μ m y 20 mm. Se analiza el problema especial de medir depósitos de estelita sobre paredes ferrificas de recipientes de reactor. Se estudia la medición de recubrimientos no conductores, aplicados sobre metales no ferrosos. Se explica el principio de medición (corrientes de Foucault), se describe un instrumento destinado a este fin y se dan ejemplos típicos de mediciones.

El autor examina también la medición de dimensiones físicas de los componentes metálicos de reactores, sin elementos en contacto con los mismos y describe diversos métodos aplicables a metales ferrosos y no ferrosos (método del campo magnético con corriente continua y alterna, método de corrientes de Foucault). Se describen instrumentos y se dan ejemplos de mediciones a distancia del diametro, ovalidad, distorsión, etc., de componentes de reactor. Se exponen métodos para medir la separación entre tales componentes, en la zona v radiactiva del reactor.

Se describe un instrumento para registrar perfiles de superficies y para indicación directa de valores de aspereza («Rauhtiefe», «Glättungstiefe», valor promedio y valor cuadrático medio). Se analizan ejemplos típicos del empleo de este instrumento para componentes de reactor. Se presta especial atención a la posibilidad de usar un captador pequeño y de aplicaciones múltiples mediante manipuladores en zonas y en materiales radiactivos. Se analiza el aumento de la aspereza superficial en función de la dosis de irradiación.

^{*} Por desgracia, en el momento de entrar en prensa, no se disponía del manuscrito de este documento (SM-63/20b). Se aconseja a los lectores que deseen obtener copias que escriban directamente al autor, Instituto Dr. Foerster, Reutlingen (República Federal de Alemania).

~ . . . •

AUTOMATIC INSPECTION OF NUCLEAR-REACTOR TUBES DURING PRODUCTION AND PROCESSING, USING EDDY-CURRENT METHODS

F. FÖRSTER AND P. MÜLLER INSTITUT Dr. FÖRSTER REUTLINGEN, FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY

Abstract — Résumé — Аннотация — Resumen

AUTOMATIC INSPECTION OF NUCLEAR-REACTOR TUBES DURING PRODUCTION AND PROCESSING, USING EDDY-CURRENT METHODS. The possibilities of automatic and semi- automatic inspection of tubes using eddy-current methods are described. The paper deals in particular with modern processes, compared to the use of other non-destructive methods. The essence of the paper is that the methods discussed are ideal for objective automatic inspection.

Not only are the known methods described, but certain new methods and their application to the detection of flaws in reactor tubes are discussed.

CONTRÔLE AUTOMATIQUE DES TUBES POUR RÉACTEURS NUCLÉAIRES AVEC DES MÉTHODES A COU-RANTS DE FOUCAULT PENDANT LEUR PRODUCTION ET LEUR TRAITEMENT. Le mémoire a trait aux possibilités de contrôle automatique et semi- automatique des tubes avec des méthodes à courants de Foucault. Il discute spécialement des procédés modernes et les compare à d'autres méthodes non destructives. L'essentiel du mémoire consiste dans la constatation que les méthodes en discussion sont idéales pour le contrôle objectif et automatique.

En outre, non seulement l'auteur met en évidence des méthodes connues, mais il décrit aussi certaines méthodes nouvelles et leur application à la détection des défauts dans des tubes pour réacteurs.

АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ТОКАМИ ФУКО ТРУБ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ В ПЕРИОД ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ. Говорится о возможностях автоматического и полуавтоматического контроля труб методами токов Фуко. Особое внимание уделяется современным методам и проводится соответствующее сравнение с учетом применения других методов без разрушения. Обсуждаемые методы являются идеальными для целевого и автоматического контроля.

Кроме того, говорится не только об уже известных методах, но и о некоторых новых методах, а также об их применении для обнаружения дефектов в трубах для реакторов.

APLICACION DE CORRIENTES DE FOUCAULT AL CONTROL AUTOMATICO DE TUBOS PARA REACTORES NUCLEARES DURANTE LA FABRICACION Y TRATAMIENTO. Se describen las posibilidades de control automático y semiautomático de los tubos usando corrientes de Foucault. La memoria trata especialmente de procedimientos modernos y los compara con otros métodos no destructivos, señalando que los procedimientos examínados se prestan de manera ideal para el control objetivo y automático. Además, no sólo se exponen los métodos conocidos, sino también algunos nuevos y su aplicación a la detección de fallas en tubos para reactores.

In the first part of the following report the principles of the eddy-current testing of ferrous and non-ferrous tubes are outlined. The results which were obtained give the answer to the following questions:

- (1) Which is the resolution for a defect at the inner wall of a tube compared with a defect of the same size at the outer wall of a tube?
- (2) Which is the dependence of the defect resolution in eddy-current testing of tubes upon the dimensions (wall thickness and O.D.), the physical properties (electrical conductivity and magnetic relative permeability) and upon the features of the test instruments (test frequency)?

The solution of these questions has led to the development and construction of test instruments with remarkable properties which are dealt with in the second part of this paper.

For the optimum lay-out of the test coil the problem was dealt with theoretically and experimentally. It was asked: Which is the amount and the distribution of a magnetic field distortion near a tube containing a defect? The geometry of this field distortion by a defect in the tube leads to important conclusions for the design of the feed-through coils of the test instruments which are shown in the second part of this report.

We regret that in this paper we do not have the space to show all these calculations of the field distortions at defects and the results for the lay-out of the instruments. The same is to be said for the theory of the pick-up coils which is used for the defect indication with the spinning-coil systems. The principles of the pick-up coil have led to numerous applications in the eddy-current technique. The principles of the coils are not yet published.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL PRINCIPLES OF THE EDDY-CURRENT TESTING OF TUBES

Generally the calculations for the resolution of inside defects of a tube are made with the well-known approximation formula for the depth penetration for magnetic A. C. fields.

$$\delta = \frac{503}{\sqrt{\sigma \cdot \mu_{\rm rel} \cdot f}} \tag{1}$$

In Eq.(1) δ means the depth penetration in mm, μ_{rel} the relative permeability, σ the electrical conductivity in $\frac{m}{\Omega \cdot mm^2}$ and f the frequency in cycles per second.

If a defect is within the range of the depth penetration it is assumed that it must be possible to detect these cracks by means of eddy currents. In fact it is not sufficient to consider only the depth penetration. In any case the ratio of the field strength at the inner wall over the magnetic A.C. field strength at the outer wall approximates the value 1 if the test frequency is sufficiently low (static case). But if the increase of the ratio of the field strength at the inner wall over the field strength at the outer wall is obtained by using a lower test frequency the resolution of inside defects which are far away from the outer surface will not be improved. ¹ The substantial factor for judging the defect resolution of inside cracks is not the magnetic field strength but the density of the eddy currents. An interruption or distortion of the eddy currents by defects in a test sample induces effects in the magnetic field of these eddy currents which make it possible to recognize a defect. The ratio of the resolution of an inside defect over an outside defect of a tube corresponds to the ratio of the eddy-current density at the inner wall to the eddy-current density at the outer wall of a tube.

¹ These facts were described thoroughly by F. Förster in the Nondestructive Testing Handbook, sections 38. 17, Fig. 18.

In the first part of this report a short summary of extensive calculations of the eddy-current conditions at ferrous and non-ferrous tubes is given. From these calculations general rules can be derived for an optimum resolution of inside defects and surface defects for the eddy-current test principles.

Besides the ratio of the eddy-current density at the inner and outer wall another requirement for a high defect resolution in tubes must be met. This is the phase angle between the eddy currents at the inner wall and the outer wall. It should have an optimum value between 40 and 100°. If the phase angle $\Delta \varphi$ between the eddy currents at the inner and the outer wall is too small no discrimination of effects due to defects and of effects resulting from variations in the wall thickness is possible. Practically both effects have the same direction in the impedance plane. In addition the defect resolution decreases if the phase angle between an eddy-current density at the inner and outer wall is below 30°.

For phase angles higher than 100° the amplitude of the eddy-current density at the inner wall of the tube will be too low. For this reason the resolution of inside cracks decreases rapidly if the phase angle is more than 100°. For high-phase angles $\Delta \varphi$ the inside defects have a component which is opposite to the component of surface defects. This leads normally to difficulties in the recognition of defects.

Figure 1 shows the ratio of the eddy-current density at the inner wall g_i over the density at the outer wall g_o as a function of the ratio f/f_g for non-ferrous tubes; f means the frequency of the eddy-current test instruments whereas f_g means the so-called limit frequency². The frequency is cal-



Ratio of the eddy-current density at the inner wall g_i over the outer wall g_o and phase-angles $\Delta \phi$ between g_i and g_o as a function of f/fg. Pafameter: $\frac{D_i}{D_i}$

² The theory of the limit frequency was outlined by F. Förster in the Nondestructive Testing Handbook, sections 36 to 39. This theory is the background for the similarity law in eddy-current testing.

culated from the O.D. of the tube D_o , the electrical conductivity σ and the relative magnetic permeability μ_{rel} according to Eq. (2):

$$f_g = \frac{5068}{\mu_{rel}} \cdot \sigma \cdot D_o^2 \, .$$

The dimension of f_g is sec⁻¹, D_o stands in cm, σ in $\frac{m}{\Omega mm^2}$.

Figure 1 shows the conditions of the eddy-current density at the inner and the outer wall of a non-ferrous tube ($\mu_{rel} = 1$) for 5 different ratios of the inner diameter D_i over the outer diameter D_o . The curves cover the range between tubes of medium wall thickness and extremely thin-walled tubes. In addition all points of equal phase angle $\Delta \varphi$ are connected by another family of curves. The range which allows a good resolution of the inside defects is marked by a dotted line. The optimum range for non-ferrous tubes for the detection of inside and outside defects is near a phase angle $\Delta \varphi = 90^\circ$. This means that the ratio 0.4 or 0.5 of the eddy-current density g_i/g_o is the optimum one. Thus, from Figure 1 the optimum frequency for the crack testing of non-ferrous tubes can be read for all normal tube dimensions (ratio of D_i/D_o). It should be noticed that the phase angle $\Delta \varphi = 90^\circ$ allows the use of two separate channels for the detection of defects at the outer wall and the inner wall respectively. The phase adjustment of these two channels differs 90°.

Figures 2, 3 and 4 show the conditions of the eddy-current density g_i/g_o for ferrous tubes. Three ratios D_i/D_o of 0.8, 0.9 and 0.95 are shown. It is evident that an increase of the magnetic permeability means a substantial decrease of the ratio g_i/g_o . The conditions shown in Figs. 2, 3 and 4 are dealt with again in Fig. 5, but here for the special case of small skin effects (static case, horizontal g_i/g_o -curves). Again the g_i/g_o -curves are shown as a function of the relative permeability. The values of Fig. 5 are calculated by means of the formula in this Figure³.

Figures 1 to 5 allow the calculation of the optimum test frequency for the detection of inside and surface defects in non-ferrous and ferrous tubes. For this purpose the limit frequency f_g is calculated from the diameter D_o , the electrical conductivity σ and the relative permeability μ_{rel} . From Figs. 1 to 5 the value of the frequency-ratio f/f_g for the optimum resolution ($\Delta \phi \approx 90^\circ$) is selected. Normally the values of D_i , D_o and σ of the tubes under test are known but mostly the relative permeability μ_{rel} is not known. Under normal eddy-current test conditions the permeability is strongly reduced by a D. C. magnetization so that the differential value of μ_{rel} is not known. This may induce a considerable error in the calculation of f/f_g .

Figures 6 to 8 show the ratio of the magnetic A.C. field strength H_i at the inner wall of the tube over the field strength H_o at the outer wall of the tube as a function of f/f_g . These conditions are shown for various D_i/D_o -ratios as well as for various permeabilities. The value of H_i/H_o can be measured with low experimental expenditure.

³ The derivation of this equation as a limit case for small arguments of the complicated calculation with Bessel- and Henkel-functions must be omitted in this paper.

AUTOMATIC INSPECTION OF NUCLEAR-REACTOR TUBES



Fig. 2

Ratio of the eddy-current density at the inner wall g_i over the density at the outer wall g_o as a function of f/fg



















F. FÖRSTER and P. MÜLLER

$$\frac{f}{f_{a}} = \frac{f \cdot \mu ret \cdot 6 D_{a}^{2}}{5068}$$



Ratio H_i/H_0 and phase-angles $\Delta \phi$ between H_i and H_0 as a function of the frequency ratio f/fg. Parameter: relative permeability μ_{rel}

So Figs. 6, 7 and 8 show it is possible to find out the relative permeability and the true f/f_g -ratio by experiment and allow the calculation of the most suitable frequency for crack testing. The description of the method of calculation must be omitted.

The curves in Figs. 1 to 9 contain the theoretical background for the optimum adaption of all eddy-current instrument parameters to a given test problem. For the sake of brevity only a rough summary of this large complex can be given.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF TEST INSTRUMENTS FOR TUBES ON THE BASIS OF THE THEORETICAL BACKGROUND

For the automatic crack detection in bars, wires, tubes or in machined parts two types of eddy-current instruments have been developed. Whereas in the first type feed-through coils are employed, in the second spinning pick-up coils are used.

(1) Instruments with feed-through coils

The most remarkable model of this type is the Defectograph (Fig. 9), an advanced eddy-current test instrument. The screen of the cathode-ray





FÖRSTER-Defectograph model 2.181. Eddy-current instrument for crack detection in austenitic and ferrous bars, wires and tubes.

tube of this instrument represents a sector of the impedance plane⁴. All effects (cracks, variations in dimensions and so on) are displayed on the screen according to direction and amount. The noise level can be suppressed by turning the phase tuner in such a way that the amplitudes originating from the noise level go into the horizontal direction. The indication on the screen as well as on the record chart are caused only by effects having a vertical component on the screen of the instrument.

Figure 10 shows one of the standardized plug-in coils as well as the two models of the magnetization yokes for diam. from 4 to 60 mm. The total diameter range from 1-120 mm is covered by four magnetization yokes. The eddy-current coils consist of a complex system to achieve a maximum signal-to-noise ratio.

Figure 11 shows the influence of the magnetic saturation of a steel tube upon the indication of a number of holes with a diam. from 0.1-2 mm. The upper part of Fig. 12 shows the noise level caused by inhomogeneous permeability in a stainless-steel tube containing three very small natural defects. In the lower part of the same Figure the signal obtained after magnetic saturation is shown. The suppression of the noise level by magnetic saturation is evident.

⁴ Protected by US-patent



Standardized plug-in coils and magnetization yoke to the FÖRSTER-Defectograph









AUTOMATIC INSPECTION OF NUCLEAR-REACTOR TUBES

Figure 13 shows a comparison of the resolution of two eddy-current test instruments. Eleven holes were drilled into the aluminium tube within a diameter range of 4 to 80 thou. This specimen was tested with one of the instruments and immediately afterwards with the other one. The left part of Fig. 13 shows the record chart obtained at a back-and-forward movement of the aluminium tube through a foreign instrument which was widely used for testing reactor tubes. The right record chart was obtained with the instrument shown in Fig. 9.





FÖRSTER - DEFECTOGRAPH 2.180

AMERICAN EDDY CURRENT TEST INSTRUMENT

Fig. 13

Comparison of the resolution of two eddy-current instruments record of 11 holes (2 - 0. 1 mm diam.) in Al-tube of 18×1.5 mm

Figure 14 shows very small defects at the inside of reactor tubes (Nicoros). The interior small flakes and seams can be seen clearly in the record. For a comparison a record of a good tube is shown also. Figure 15 shows a full-automatic unit for the inspection of reactor tubes. With such a unit not only round but also hexagonal and square bars can be tested. In Europe more than 150 of these instruments are in use.

The lower limit of the diameter range for the Defectograph shown in Fig. 9 is near 1 mm. For the crack testing of thin wires special high-frequency crack-testing instruments are in use. There is an instrument with diameter range from 2 to 0.2 mm. Another unit which is shown in Fig. 16 is a fine-wire crack detector for the range from 0.025-0.2 mm. The test frequency is of the order of 100 MHz. The instrument evaluates automatically the quality of the wires on a printer. The defective lengths contained in any subsequent 100 m of wire length (100, 200, 300, 400 m and so on) are printed automatically so that the statistical distribution of defects along a wire coil can be read directly on the printed chart which is a permanent quality document of a tested wire coil.

Figure 17 shows the record of defects in tungsten wire with a $50-\mu m$ diam. The wire length recorded on Fig. 17 is 75 m. The ingoing and outgoing side of the test coils for these thin wires are fitted with bored precious stones for the protection of the extremely sensitive test coil. Figure 18 shows such a standardized coil for thin wires.



Fig. 14

Example of test results obtained with the Defectograph at Nicoros reactor tubes



Fig. 15

In-line installation of FÖRSTER-Defectograph 2.181 (by courtesy of Messrs. Schoeller-Werke KG, Hellenthal)

(2) Instruments with spinning pick-up coil systems

In addition to the instruments with feed-through coils the number of crack-testing instruments using pick-up coils has been strongly increased recently. In this principle a pick-up coil rotates around the round test piece



Fig. 16

FÖRSTER fine-wire crack detector for a diameter range of 25 to 200 μm



FÖRSTER fine-wire crack detector Record of cracks in tungsten-wire $Ø = 50 \ \mu\text{m}$, length = 750 m (3000 in)

(bar, tube and so on) which is moved in axial direction through the spinning pick-up coil system.

Figure 19 shows an eddy-current crack-test equipment with a spinning coil. According to the above-mentioned theory pick-up coils with a special



Fig. 19

Crack-testing equipment with spinning pick-up coils

field-focusing effect have been developed. These new pick-up coils are fairly insensitive to the so-called list-off effect. This means that its efficiency does not depend very much upon the distance between the coil and the surface of the test piece which is a remarkable advance compared with normal pick-up coils.

For this reason the new spinning pick-up coils rotate without touching the surface. There is no wear of the coils and there can be no traces of the coil systems on a soft test piece. An electronics system controls automatically the sensitivity of the amplifier so that, within a certain lift-off range, the defect signal does not vary with the distance between the pick-up coil and the test piece.

AUTOMATIC INSPECTION OF NUCLEAR-REACTOR TUBES

Figure 20 shows the indication of a crack with a depth of 0.15 mm in a steel wire. The wire is 4.6 mm diam. The distances between coil and test piece were 0.1, 0.5 and 1 mm respectively. There is no variation of the amplitude of the defect signal with the increasing distance of the pick-up coil, only the width of the defect signal increases as expected. This automatic control effect is obtained by the fact that the complex pick-up coil system is not only sensitive to defects but also gives a signal voltage which corresponds to the distance between pick-up coil and the test piece. This latter voltage is used for the automatic control of the defect sensitivity. An evident example of the function of a field-focusing pick-up coil attached to an automatic sensitivity control circuit is shown in Fig. 21.





FÖRSTER-Circograph Automatic sensitivity control and compensation of lift-off effects

Figure 21a shows the decrease of the signal of a crack with a depth of 0.8 mm as a function of the distance of the pick-up coil. The pick-up coil varies from 1.5 to 10.5 mm. The decrease of the defect signal of the field-focusing pick-up coil is much slower than the decrease of the signal voltage of a generally known pick-up coil.

Figure 21b shows the signal of the same crack in the same range of distances when it is automatically controlled with increasing distance between pick-up coil and surface of the test piece. The remarkable feature of Fig. 21 is the fact that there is practically no change in the signal voltage when the distance of the pick-up coil to the test piece varies between 1.5 and 10.5 mm. The facts contained in Figs.20 and 21b are of great importance to the technique of eddy-current testing. There is no longer any need for



Sensitivity of field-focused pick-up-coil (eddy currents) without automatic control





Automatic sensitivity control of field-focused pick-up-coil (eddy currents)

the pick-up coil to slide on the test piece, i.e. it is possible to use a much higher rotating speed than the normal test heads. By this means higher test speeds can be achieved. In addition, rough surfaces, for instance in the as-rolled condition, and with a low accuracy of their shape can be tested. The above-mentioned theory of the pick-up coil allows roughness defects and defects due to geometrical irregularities to be suppressed. This is achieved by the use of an optimum frequency and an optimum phase setting for a given test problem.
AUTOMATIC INSPECTION OF NUCLEAR-REACTOR TUBES

Figure 22 shows the signal of a crack contained in a test piece which is out of round. The signal is shown for distances of the pick-up coil of 0.1 and 1 mm of the surface of the test piece. In the left part of the picture the signals are shown without suppression of the effects of non-circularity. In the right part these defects are suppressed.



CRACK IN A STEEL ROD OF 4.6mm DIAMETER MÁTERIAL 100 Cr 6

SUPPRESSION OF LIFT-OFF EFFECTS

Fig. 22

FÖRSTER-Circograph

Figure 23 shows the signal of a crack with a depth of $80 \ \mu m$. It is shown with and without suppression of the influence of the surface roughness to the eddy currents. Figure 24 shows a series of models of instruments (Circograph) using spinning coil systems. The diameter range is 5-25 mm, 20-60 mm and 50-130 mm respectively.

Figure 25 shows 2 in-line eddy-current instruments using combined feedthrough and spinning pick-up coil systems. Here, the test pieces pass first through the feed-through coil and then through the spinning pick-up coil systems. The feed-through coils are so-called differential systems which record the variation of the crack depth at the outer wall, within the wall and at the inner wall. The spinning pick-up coils give a quantitative record of the absolute depth of surface cracks. Numerous units as shown in Fig. 25 are working 24 h/d. The test parts pass through the unit with an average speed of 2 m/s. The opposite extreme is shown in Fig. 26. Here a rotating eddy-



SUPPRESSION OF NOISE LEVEL BY PHASE CONTROL

STEEL ROD 7.9mm DIAMETER / MATERIAL X 45 SiCr 9 GROUND

CRACK DEPTH 80 MICRONS (.003")



Fig. 23 FÖRSTER-Circograph



Fig. 24

FÖRSTER-Circograph for diam. ranges 5-25, 20-60 and 50-130 mm

current probe is used for inspecting the inner diameter of tubes. This thick-walled tube has an I.D. of 3 mm.

In the upper left quarter of the Figure some photographs of the signal of small defects are shown. The defects are at the inner wall of the tube. The signals represent the development of the inner circumference of the tube at a certain section. The method of the inside scanning of tubes by means of a spinning pick-up coil with field-focusing effect opens the door for many new applications, especially for tubes with larger diameters and for thick-walled tubes. The method will be used for such tubes in which even smallest defects at the inner wall must be detected.





In-line installation of combined eddy-current instruments using feed-through coils and spinning pick-up coil systems



Fig. 26

Spinning coil for crack testing of small thick-walled tubes (I. D. = 3 mm)

Tubes being used as reactor components are usually inspected with a differential inside coil⁵ but there is no doubt that the spinning pick-up coil with field-focusing effect gives a higher resolution by far for inspecting the inner wall of tubes. With the pick-up coils the inner wall is scanned point by point. With the normal differential coils only an average over the total inner circumference of the tube is obtained.

Finally, we point out that small parts can be crack-tested automatically with the eddy-current method. For this purpose the test part can be rotated and a pick-up coil can be led along the axis of the test part. It is also

⁵ e.g. H.L. Libby. "An improved eddy-current tubing test" (Materials Evaluation, April 1965).

possible that the rotating pick-up coil scans the specimen under test. Many such full- or semi-automatic eddy-current test instruments for mass-produced parts are in operation in industry.

DISCUSSION

SM-63/19, 20a and 20 b (presented by P. Müller). (It was agreed that these papers should be discussed together.)

V. GERASIMOV: How do you employ the phase method of defect detection in practice, in view of the fact that there may be variations in such parameters as magnetic permeability, electric conductivity, inner and outer diameter, and wall thickness?

P. MULLER: The most important parameter is the permeability, and for this reason we used DC yokes for magnetic saturation. This is important for stainless steel as well as ferrous tubes since, while the permeability of a stainless-steel tube is theoretically equal to one, in practice it always contains a lot of delta ferrite, leading to high background noise.

P. de MEESTER: Can you tell us what accuracy has been obtained for wall-thickness measurements on tubes with an outer diameter of about 8 mm and a wall thickness of 0.5 mm?

P. MÜLLER: We have obtained a resolution of the order of 5%.

P. de MEESTER: Do you think there is any advantage in using eddy currents instead of ultrasonics for defectoscopy in fuel-element canning?

P. MULLER: One thing we can do with eddy currents is to use two channels, if the apparatus is adjusted to the proper phase setting. One channel is sensitive to defects in the inner wall and the other to defects in the outer wall. Thus we can discriminate between external and internal defects, obtaining, as I said, a resolution of the order of 5%. This figure can also be obtained using ultrasonic methods, but it depends on the parameters. For instance in stainless steel containing a large amount of delta ferrite or in welded tubes, the application of ultrasonics is somewhat difficult because the welds and the delta ferrite can cause comparatively low signal-to-noise ratio. By means of the DC saturation technique, this noise level is avoided with eddy currents. There are certainly problems for which ultrasonics give a better resolution, but on the other hand there are many problems which can be solved better, in my opinion, by means of eddy currents. However, it is difficult to make any general judgement; each case should be decided on its merits.

D.C. WORLTON: Could you please elaborate on compensating techniques for probe spacing variation?

P. MULLER: The further the probe is away from the surface of the specimen, the slower the reaction of the eddy currents on the probe itself. So if you measure the absolute voltage of the probe coil, this voltage gives directly a measure for the distance. Very high accuracy can be obtained, but, of course, for measurements of sensitivity control this high accuracy is not needed. It is a different thing to measure automatically the sphericity of tubes, for instance. For such purposes this method is really a means

of checking rather than of measurement, because many parameters are involved. Thus the error in such automatic measurements of sphericity may be comparatively high, say of the order of 10%, though for an inspection, for an in-line inspection, this will very often be sufficient to say whether or not there is significant ovality.

R. NEIDER: Did you achieve the focusing effect with the pick-up coil by means of a phase-sensitive measurement?

P. MULLER: No, we developed sophisticated coil systems which induce field focusing.

R. NEIDER: Did you check by measurement the theoretical results shown in Figs. 1-8 of last paper.

P. MULLER: Yes, and the agreement was excellent. We checked very carefully that the parameters used in the calculation were the correct ones, and our measurements justified our assumptions.

R. NEIDER: How did you measure the eddy-current density?

P. MULLER: It is not very easy to measure the eddy-current density, although it can be estimated from the signals obtained from standard cracks. However, it is quite easy to measure the ratio of the AC magnetic field H_i/H_o , and if you perform these measurements and carry out your tests correctly, it is easy to find out whether or not the calculations are consistent. Ours were.

A.D. MCEACHERN: Your examples showing the success of phasesuppression for defect detection were for steel rods. Are these methods worthwhile for thin-walled tubes? We have found with Zircaloy tubes of 0.6-in outer diameter and 0.017-in wall thickness that the necessary increase in gain to compensate for the lower flaw signal with phase suppression eliminated the advantage. That is, the signal-to-noise ratio was no better.

P. MÜLLER: This is in contradiction to our measurements. If the apparatus is not set to its optimum frequency the improvement achieved by setting the phase to another angle is sometimes negligible. This is most important; if the wrong frequency is used, phase control systems are no use, because the indication due to a variation in dimension goes in the same direction as the indication due to a crack, so that no discrimination between diameter variation and crack is possible.

E. LABUSCA: Do you also have the equipment to measure changes in permeability during as well as after irradiation?

P. MULLER: No. Of course, in principle such measurements would be possible but only on condition that you have enough space in the pile to insert the coil of 3-in diameter and 6-in length. Under these conditions it would be possible, but I am afraid such measurements would be fairly expensive.

A. VAN DER LINDE: With reference to Mr. de Meester's question on the relative merits of ultrasonic and eddy-current testing, I can give the results of some tests performed by the Röntgen Technische Dienst and the Reactor Centrum Nederland in 1963.

The methods used were:

- (a) Eddy-current testing with an internal probe; Sperry Introview. Frequency=1 kHz. Inspection speed=7.5 cm/s.
- (b) Eddy-current testing with an external probe; Budd-RADAC. Frequency= 64 kHz. Inspection speed= 50 cm/s.

(c) Ultrasonic testing with a method nearly the same as that described

in our paper.

The dimensions of the Zircaloy-2 canning tubes tested were I. D. = 10 mm, O. D. = 12 mm, 1=1500 mm. In one typical tube the number of defects with a depth greater than 50 μ m, detected by the methods mentioned was three for methods (a) and (b) and five for method (c). In comparing the three methods it was concluded, in 1963, that the ultrasonic method was the most reliable and sensitive one. Method (a) was rejected because smaller defects could not be detected. The amplitudes on the records obtained by us with the Budd-RADAC instrument from a calibration tube, containing holes with diameters in the range 0.2-1.0 mm, were higher by a factor of about 5 than those presented in Fig. 13 of Förster's paper.

P. MULLER: I must emphasize that it is important to use the right instrument parameter. An eddy-current detector is equipped with various plug-in units using frequencies from 2 kHz to something like 300 kHz. This variation in ratio shows that it is important to use a good frequency range. Would I be correct in assuming that the results you obtained with the Sperry instrument were less satisfactory?

A. VAN DER LINDE: No.

P. MULLER: In that case it is really astonishing that you obtained such a high resolution for a Zircaloy tube of 1-mm wall-thickness, using a frequency of 1 kHz. It is an excellent result to detect defects of the order of 10-15% of the wall thickness, because this frequency is definitely too low. The frequency of the Budd-RADAC was certainly better.

SYMPOSIUM ON NON-DESTRUCTIVE TESTING IN NUCLEAR TECHNOLOGY

HELD AT BUCHAREST, 17-21 MAY 1965

CHAIRMEN OF SESSIONS

Session I	H. HULUBEI	Romania
Session II	A. KISELEV	USSR
Session III	P. de MEESTER	Belgium
Session IV	P. THOME	France
Session V	R.F. HANSTOCK	United Kingdom.
Session VI	G. LECCIOSOTTI	Italy
Session VII	G.H. TENNEY	United States of America
Session VIII	R. FORSYTH	Sweden
Session IX	R. SEIFERT	Federal Republic of Germany
	SECRETARIAT OF THE	E SYMPOSIUM
Scientific Secretaries:	J.C. DELANEY	Division of Nuclear Power Reactors, IAEA
	A. PUSHKOV	Division of Nuclear Power Reactors, IAEA
Administrative Secretary:	K. ZŸBYLSKI	Division of Scientific and Technical Information
Editor:	MONICA KRIPPNER	Division of Scientific and Technical Information
Records Officer:	D. MITCHELL	Division of Languages

393

• - · · · · · • • . -

IAEA SALES AGENTS

Orders for Agency publications can be placed with your bookseller or any of our sales agents listed below:

- A R G E N T I N A Comisión Nacional de Energía Atómica Avenida del Libertador General San Martin 8250 Buenos Aires - Suc. 29
- AUSTRALIA Hunter Publications, 23 McKillop Street Melbourne, C.1
- A USTRIA Georg Fromme & Co. Spengergasse 39 Vienna V
- BELGIUM Office international de librairie 30, avenue Marnix Brussels 5
- BRAZIL Livraria Kosmos Editora Rua do Rosario, 135-137 Rio de Janeiro
 - Agencia Expoente Oscar M. Silva Rua Xavier de Toledo, 140+1º Andar (Caixa Postal No. 5.614) São Paulo

BYELORUSSIAN SOVIET SOCIALIST REPUBLIC See under USSR

CANADA The Queen's Printer Ottawa, Ontario

CHINA (Taiwan) Books and Scientific Supplies Service, Ltd., P.O. Box 83 Taipei

CZECHOSLOVAK SOCIALIST REPUBLIC S.N.T.L. Spolena 51 Nové Mesto Prague 1 D E N M A R K

Ejnar Munksgaard Ltd. 6 Nörregade Copenhagen K FINLAND Akateeminen Kirjakauppa Keskuskatu 2 Helsinki FRANCE

Office international de documentation et librairie 48, rue Gay-Lussac Paris 5^e

GERMANY, Federal Republic of R. Oldenbourg Rosenheimer Strasse 145 8 Munich 8

HUNGARY Kultura Hungarian Trading Co. for Books and Newspapers P.O.B. 149 Budapest 62

ISRAEL Heiliger and Co. 3 Nathan Strauss Street Jerusalem

ITALY Agenzia Editoriale Internazionale Organizzazioni Universali (A.E.I.O.U.) Via Meravigli 16 Milan

- JAPAN Maruzen Company Ltd. 6, Tori Nichome Nihonbashi (P.O. Box 605) Tokyo Central
- MEXICO Libraria Internacional Av. Sonora 206 Mexico 11, D.F.
- NETHERLANDS N.V. Martinus Nijhoff Lange Voorhout 9 The Hague

NEW ZEALAND Whitcombe & Tombs, Ltd. G.P.O. Box 1894 Wellington, C.1 NORWAY Johan Grundt Tanum .Karl Johans gate 43 Oslo

PAKISTAN Karachi Education Society Haroon Chambers South Napier Road (P.O. Box No. 4866) Karachi 2

POLAND Ośrodek Rozpowszechniana Wydawnictw Naukowych Polska Akademia Nauk Pałac Kultury i Nauki Warsaw

ROMANIA Cartimex Rue A. Briand 14-18 Bucarest

SOUTH AFRICA Van Schaik's Bookstore (Pty) Ltd. Libri Building Church Street (P.O. Box 724) Pretoria

SPAIN Libraria Bosch Ronda de la Universidad 11 Barcelona

SWEDEN C.E. Fritzes Kungl. Hovbokhandel Fredsgatan 2 Stockholm 16 SWITZEBLAND Librairie Pavot Rue Grenus 6 1211 Geneva 11 TUBKEY Librairie Hachette 469. Istiklål Caddesi Beyoglu, Istanbul UKBAINIAN SOVIET SOCIALIST REPUBLIC See under USSB UNION OF SOVIET SOCIALIST **BEPUBLICS** Mezhdunarodnaya Kniga Smolenskava-Sennava 32-34 Moscow G-200 UNITED KINGDOM OF GREAT BRITAIN AND NORTHERN IRELAND Her Majesty's Stationery Office P.O. Box 569 London. S.E.1 UNITED STATES OF AMERICA National Agency for International Publications, Inc. 317 East 34th Street New York, N.Y. 10016 VENEZUELA Sr. Braulio Gabriel Chacares Gobernador a Candilito 37 Santa Rosalia (Apartado Postal 8092) Camcas D.F.

Y UGOSLAVIA Jugoslovenska Knjiga Terazije 27 Belgrade

.

IAEA publications can also be purchased retail at the United Nations Bookshop at United Nations Headquarters, New York, at the news-stand at the Agency's Headquarters, Vienna, and at most conferences, symposia and seminars organized by the Agency.

In order to facilitate the distribution of its publications, the Agency is prepared to accept payment in UNESCO coupons or in local currencies.

Orders and inquiries from countries where sales agents have not yet been appointed may be sent to:

Distribution and Sales Group, International Atomic Energy Agency, Kärntner Ring 11, Vienna I, Austria INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY VIENNA, 1965 *e¹ *

• . •

PRICE: USA and Canada: US \$8.00 Austria and elsewhere: S 168,-{ £2.8.0; F.Fr. 32,-; DM 28,- }