

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

CENTRE D'ETUDES NUCLEAIRES DE SACLAY

Service de Documentation

F91191 GIF SUR YVETTE CEDEX

CEA-CONF -- 8892

R2

SOUDEGE PAR PRESSION MAGNETIQUE. APPLICATION AUX ELEMENTS

DE GAINAGE EN ACIERS INOXYDABLES

Gallizzi, H.; Colombe, G.

CEA CEN Cadarache, 13-Saint-Paul-Durance
(France). IRDI

Communication présentée à :

Magnetic forming conference
Grenoble (France)
27-28 Nov 1986

SOUDEGE PAR PRESSION MAGNETIQUE
APPLICATION AUX ELEMENTS DE GAINAGE
EN ACIERS INOXYDABLES

Par Hervé GALLIZZI et Gérard COLOMBE



SOUDEGE PAR PRESSION MAGNETIQUE
APPLICATION AUX ELEMENTS DE GAINAGE EN
ACIERS INOXYDABLES

PULSED MAGNETIC WELDING
APPLICATION OF FAST BREEDER
AUSTENITIC PINS PLUGGING

RESUME :

Pour des raisons spécifiques au nucléaire, nous avons été conduits à développer le soudage de matériaux fortement résistifs tels que les aciers inoxydables. La pression magnétique est engendrée par une bobine explosive et transmise aux pièces à souder par un propulseur en alliage léger.

Un travail théorique a permis de situer la technique de soudage par impulsion électrique par rapport à la technique par explosion.

A l'aide d'une instrumentation spéciale, il a été possible d'étudier les phénomènes électriques et magnétiques durant la phase active du soudage.

Au moyen de l'ensemble des informations acquises, nous avons rédigé un cahier des charges et fait réaliser avec l'aide de l'ANVAR, un générateur rapide à basse impédance, permettant d'envisager le soudage au moyen de bobines indestructibles.

SUMMARY :

For specific nuclear needs, we had to develop pulsed magnetic welding on high resistivity coefficient alloys as austenitic steels.

The magnetic force produced by an explosive inductor is transmitted on weld pieces by the use of an aluminium driver.

A theoretical work carried out permitted to compare pulsed magnetic welding with explosive welding.

With specific recordings, it was possible to study electrical and magnetical behavior during the active welding phase.

By means of these informations, we are able to specify and to realize, with the financial help of ANVAR organisation, a low impedance high velocity generator permitting to weld with a non destructible inductor.

1- INTRODUCTION

Le soudage par pression magnétique ou selon notre terminologie par impulsion électrique (I. E.) présente un intérêt de première grandeur dans la fabrication des éléments combustibles de nouvelle génération de la filière à neutrons rapides. En effet il est envisagé pour les matériaux de gainage des alliages dont la soudabilité à chaud est très mauvaise.

Le soudage par I.E. est obtenu sans fusion des matériaux et de ce fait peut permettre des liaisons totalement impossibles par les procédés classiques (TIG, bombardement électronique, laser).

Cette technique de soudure a déjà été développée aux USA pour les mêmes besoins que les nôtres. Par contre les choix technologiques adoptés par les américains entraîne des prix et des investissements qui semblent hors de notre portée (1).

Notre travail (2) a consisté à démontrer la faisabilité et la contrôlabilité du soudage par impulsion électrique, et de caractériser métallurgiquement et mécaniquement la liaison. Pour cela nous avons utilisé dans un premier temps des bobines explosives à haut rendement pour palier les faibles vitesses de décharge des générateurs d'impulsions disponibles sur le marché. L'objectif à terme est de souder en boîte-à-gants avec une bobine multispire indestructible, le tout dans des conditions économiques acceptables.

2- DESCRIPTION DE L'INSTALLATION DE SOUDAGE

a) Présentation du problème

Une aiguille combustible est un ensemble composé d'une gaine protectrice dans laquelle on introduit du combustible fissile, deux bouchons soudés aux extrémités isolent le combustible du fluide caloporteur, figure 1.

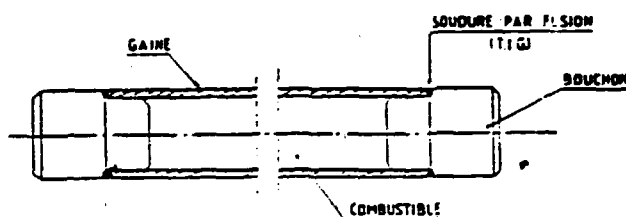


FIGURE 1 - SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE AIGUILLE COMBUSTIBLE

Les gaines et les bouchons sont en acier inoxydable. Les liaisons peuvent être homogènes ou hétérogènes.

La géométrie du bouchon est adaptée pour le Magnétosoudage, figure 2. Il est composé de trois parties : "A" partie cylindrique qui assure le centrage et le maintien du bouchon pendant le soudage. Une partie conique "B" correspond à la "plaque de base" ; l'angle " α ", angle statique avec la gaine "plaque mobile", a été défini en tenant compte des résultats de soudures par explosion et de la longueur soudée (4 fois l'épaisseur gaine), c'est la partie du bouchon où l'on réalise la jonction. La troisième partie "C" est fonction du rôle joué par le bouchon dans l'assemblage combustible et facilite la mise en place du bouchon dans la gaine.

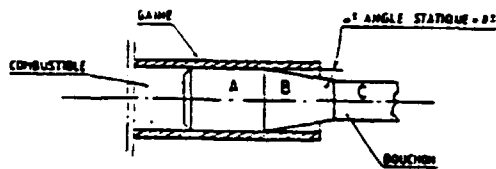


FIGURE 2 - SCHEMA DE PRINCIPE DE LA GEOMETRIE DES BOUCHONS

Les éléments à souder mis en place, on emmanché sur la gaine, dont l'épaisseur de peau "δ" est bien supérieure à son épaisseur, un tube propulseur, figure 3a, en métal malléable et bon conducteur. Ce tube est appelé PROPULSEUR, il est le siège du courant induit "I", c'est lui qui se déforme dans le champ magnétique variable de la bobine et propulse la gaine à grande vitesse contre le bouchon, figure 3b et 3c

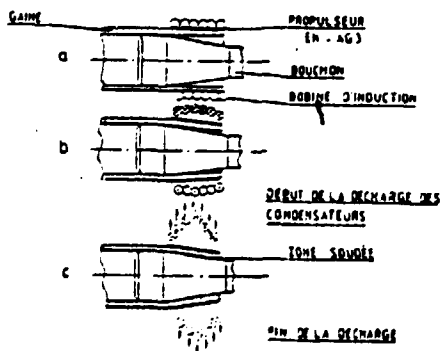


FIGURE 3 - SCHEMA DE PRINCIPE DU SOUDAGE DES BOUCHONS/GAINÉ PAR MAGNETOSOUDEGE

b) Principe du générateur d'impulsions électriques

De telles machines fig 4 sont actuellement développées par la Société BARRAS-PROVENCE, qui a mis au point une série de générateurs de diverses puissances spécialement adaptés aux applications de sertissage et de magnétoformage. Ces générateurs délivrent des énergies de plusieurs dizaines de kilojoules en quelques dizaines de microsecondes.

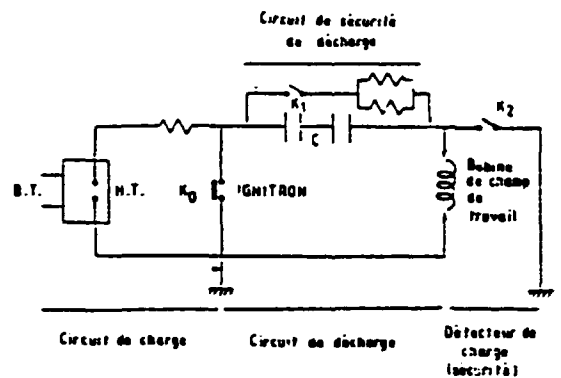


FIGURE 4 - SCHEMA DE PRINCIPE DU GENERATEUR UTILISE

- Interrupteur "K₀-K₁" ouvert "K₂" fermé, on place la bobine de soudage.
- On introduit dans la bobine les pièces à souder (bouchon emmanché dans la gaine, coiffée de son propulseur).
- Interrupteur "K₁" ouvert, on charge le condensateur "C".
- Avec l'interrupteur "K₀" (IGNITRON) on décharge rapidement les condensateurs. Le circuit de décharge est fermé, la bobine est parcourue par le courant de décharge "I" (forme sinusoïdale amortie) créant dans la bobine un champ magnétique variable H.

Le générateur que nous utilisons pour nos essais est un GIPE-8, GENERATEUR D'IMPULSIONS PROTOTYPE EUROPEEN, qui délivre une énergie maximum de 8 kilojoules sous une tension de charge de 15 kilovolts.

c) Etude et description des bobines consommables

Compte tenu de la géométrie des pièces à souder, (le diamètre de la gaine est de 6,55 mm pour une épaisseur voisine de 0,45 mm) et des caractéristiques électriques du générateur "GIPE-8", nous avons réalisé une bobine consommable adaptée au générateur.

Le courant "I" de décharge du générateur qui parcourt la bobine créant le champ magnétique variable.

Le champ magnétique "H" de la bobine inductrice créateur des forces magnétiques.

Le temps $t = \frac{T}{4}$ de la première amplitude, temps pendant lequel est réalisé le déplacement et la soudure.

b) Description de l'installation de mesure

La figure 8 présente le schéma de principe de l'installation de mesures que nous avons adapté, sur le circuit générateur/bobine, pour la mesure des paramètres électriques.

Cet ensemble se compose d'une boucle de ROGORSKY et d'une boucle simple, coulée dans l'Araldite. La mesure à distance se fait par deux câbles BNC de 5 mètres de long soudés aux capteurs. Le signal électrique de la boucle de ROGORSKY passe par un intégrateur, (de 10 KΩ et 220 10⁻⁹ F). La boucle simple sert à déclencher l'oscilloscope COULD.S0 #200 à mémoire. Cet ensemble permet la mesure, du courant "I" de décharge, le $\frac{dI}{dt}$, c'est-à-dire la période T et l'allure du champ créé. La sensibilité de la boucle de ROGORSKY avec intégrateur est de 11,3 mV/kA ± 5 %, la réalisation et l'étalonnage ayant été le résultat de notre collaboration avec le CEA/DAM.

Pour la mesure du champ "H", on utilise une deuxième boucle simple, sonde de champ placée sur un support isolant et rigide reliée à l'intégrateur (10 kΩ et 220.10⁻⁹ F). La sensibilité de la sonde avec intégrateur est de 15.5 mV/TESLA ± 5 %.

c) Enregistrements et analyse des résultats

Les essais ont été réalisés avec l'ensemble GIPE-8 de valeur capacitive de 80.80.10⁻⁹ F, plus bobine consommable avec doigt de gant, dans les conditions de soudage.

L'analyse des enregistrements figures 9, 10, 11 montre qu'à partir d'une tension de charge de 6 kV₀, l'intensité de décharge n'est plus utilisée dans sa totalité pour créer un champ magnétique "H". Ce phénomène s'accroît en fonction de l'augmentation de la tension de charge.

On voit sur la figure 11 que le temps "t" donné par l'enregistrement du $\frac{dI}{dt}$ se compose du temps "t_H" pendant lequel la bobine est créatrice du champ crête "H" et du temps "t_{c.c}" (temps de court-circuit, "t_{c.c}" = "t" - "t_H") pendant lequel la bobine ne se comporte plus comme un solénoïde, créateur de champ, mais comme un fusible (la bobine explose) ; à partir de "t_H", le champ chute.

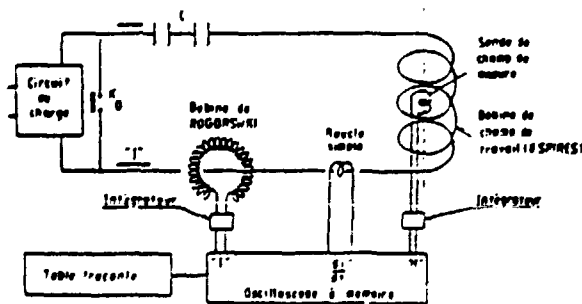


FIGURE 8 - SCHEMA DE PRINCIPE DE L'INSTALLATION DE MESURES

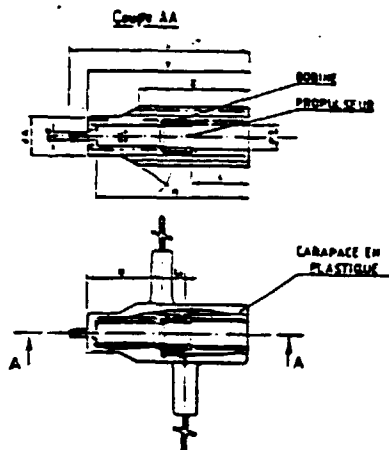


FIGURE 5 - SCHEMA D'UN CAPUCHON PROGRAMMEUR

Cette bobine, figure 5, est appelée CAPUCHON PROGRAMMEUR. La bobine et le propulseur sont réunis dans un enrobage plastique qui facilite les manipulations et le positionnement exact et reproductible de la bobine et du propulseur par rapport à la zone à souder.

La carapace en plastique est un facteur positif important, elle retarde la déformation de la bobine et augmente ainsi le rendement de la bobine. Par contre, la grande quantité de déchets qui subsiste après l'explosion est un handicap.

Le fil utilisé pour la fabrication de la bobine est de diamètre 1,2 mm, émaillé, il apporte le meilleur compromis entre le nombre de spire et la section de cuivre nécessaire, l'intensité du courant est de plusieurs dizaines de kiloampères.

Compte tenu des résultats satisfaisants obtenus avec le CAPUCHON PROGRAMMEUR (6) sur échantillon et sur gaines vides, nous avons, dans le cadre du soudage des aiguilles combustibles, développé un nouvel ensemble, figure 6, composé d'une bobine simple dans laquelle on introduit un manchon isolant. Ce manchon est appelé DOIGT de GANT, il sépare la partie propulsive (bobine explosive + plastique) de la partie propulsée (propulseur + gaine) susceptible de présenter une "activité" après le remplissage de la gaine en combustible fissile. Cet ensemble est utilisé pour réaliser la deuxième soudure et fermer l'aiguille combustible.

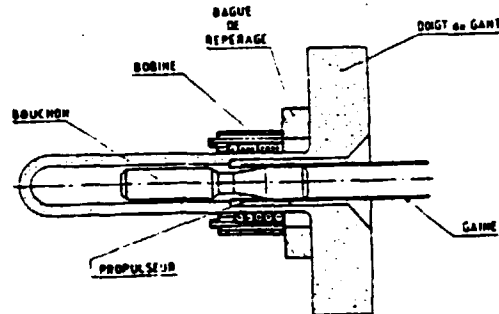


FIGURE 6 - SCHEMA DE PRINCIPE DE LA BOBINE AVEC DOIGT DE GANT

3- DEFINITION ET MESURES DES PARAMETRES ELECTRIQUES

a) Définition des paramètres électriques

Les paramètres électriques importants qui interviennent dans le processus de soudage par pression magnétique, figure 7, sont :

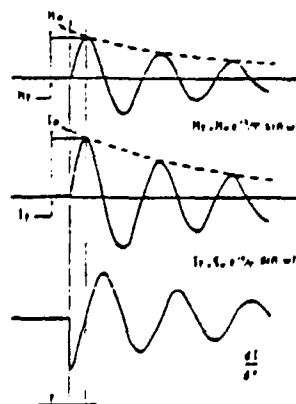


FIGURE 7 - ENREGISTREMENTS DES PARAMETRES ELECTRIQUES CHAMP "H" - COURANT "I" - TEMPS "t"

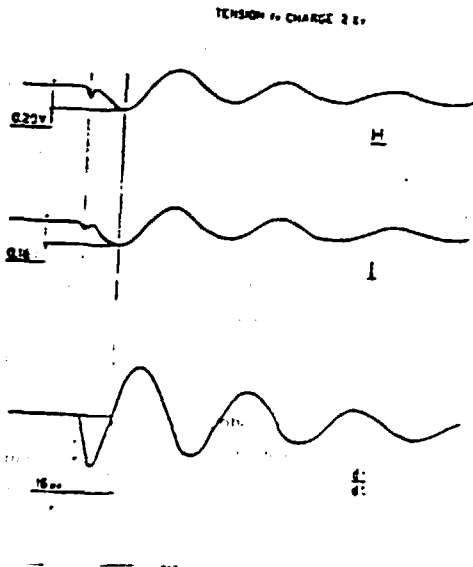


FIGURE 9

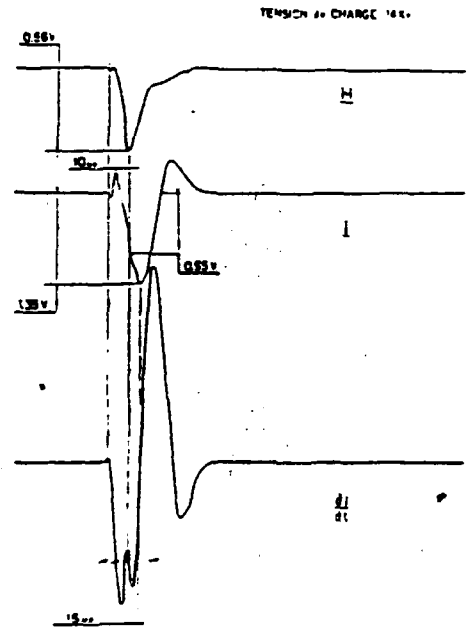


FIGURE 11

4- PARAMETRES INTERVENANT DANS LA FORMATION DE LA LIAISON

a) Paramètres vitesses

La figure 12 représente la géométrie de la déformation un court instant après le tir, dans la plage de la pression magnétique maximum et avant que celle-ci ait atteint l'extrémité de la zone soudée.

Par hypothèse on estime que le parcours de la gaine dans les conditions de nos essais se fait dans la première amplitude c'est-à-dire pour $t = 10 \mu s$.

En utilisant l'analyse du mécanisme de formation de la liaison préconisée par BIRKHOFF (3) et CROSSLAND (4) nous avons quantifié les paramètres les plus influents dans la réalisation de cette jonction, par impact à grande vitesse figure 12.

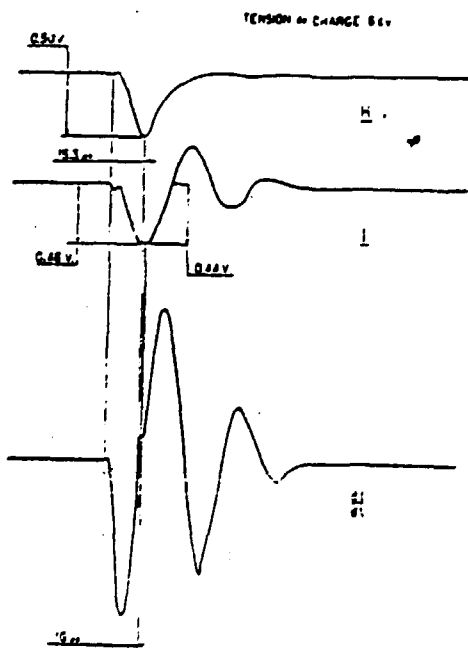


FIGURE 10

Par construction, la distance à parcourir à la gaine pour recouvrir le bouchon est de 6 mm.

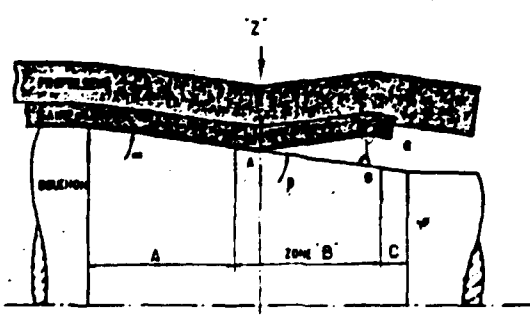
$$V_g = 0,60 \cdot 10^3 \text{ m/seconde}$$

On détermine ensuite la vitesse de déformation du propulseur V_p , obtenue sous l'action de la pression électromagnétique créée dans le propulseur "P₀", en considérant que celui-ci se déforme en compression plane, l'angle statique α étant petit.

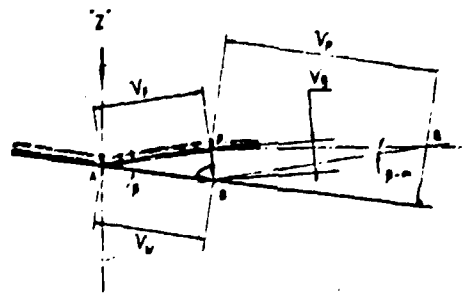
D'autre part, le propulseur n'ayant qu'un rôle "pousseur" équivalent à l'explosif du soudage par explosion, on fait l'hypothèse que seule la gaine est concernée par la déformation.

Dans le cadre de nos essais, avec un Acier Austénitique "316 Tlc" et propulseur en "AG3", on calcule :

$$v_p = 4,2 \cdot 10^3 \text{ m/s}$$



a) SCHEMA DE LA DEFORMATION



b) SCHEMA DES VECTEURS VITESSES

FIGURE 12 - SCHEMA DE LA PROPULSION DE LA GAINE SUR LE BOUCHON

AVEC :

Théorie de BIRKHOFF		Théorie de CROSSLAND	
$APB = \frac{\pi}{2} - \frac{\beta - \alpha}{2}$	ou	-	$\frac{\pi}{2}$
$ABP = \frac{\pi}{2} - \frac{\beta + \alpha}{2}$	ou	-	$\frac{\pi}{2} - \beta$

b) Paramètres métallurgiques

Estimation d'un nombre de REYNOLDS caractérisant la formation des ondes de liaison

On utilise la théorie de COWAN (5) qui a établi des conditions pour la transition d'interfaces douces à des interfaces ondulées, à partir d'une vitesse critique de V_f . Cette vitesse permet à la gaine et au bouchon au point de stagnation "A" d'être dans le domaine élasto-plastique et le nombre de REYNOLDS est défini avec le terme de limite élastique E, que COWAN a caractérisé par les valeurs de dureté de chacun des matériaux (gaine et bouchon). D'autre part, les matériaux sont caractérisés par les valeurs moyennes de la densité.

Pour les essais réalisés avec les aciers austénitiques :

$$Re \approx 10,5$$

Il est important de signaler que contrairement aux techniques traditionnelles les paramètres métallurgiques ne sont ni la température de fusion ni les compositions chimiques.

5- CONTROLES ET CARACTERISATION DE LA SOUDURE

Pour répondre à nos besoins nous avons mis au point des contrôles non destructifs et destructifs spécialisés. Nous avons également procédé à une caractérisation mécanique de la liaison. Dans tous les cas le courant de décharge est contrôlé sur oscilloscope.

a) Contrôles non destructifs

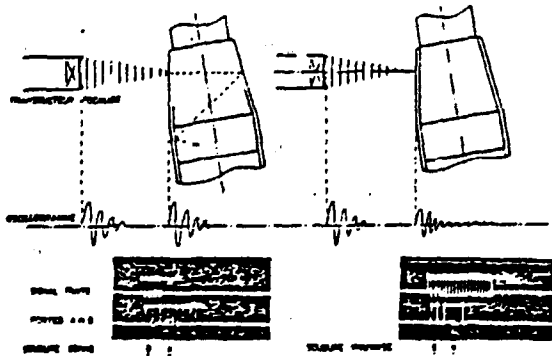
Les moyens utilisés sont : le test d'étanchéité par détecteur d'hélium et le contrôle ultrasonore (figure 13). Ces deux procédés sont particulièrement bien adaptés aux contrôles de série en temps réel.

b) Contrôles destructifs

En plus des examens métallographiques classiques (figure 14), nous avons développé un test d'épluchage qui consiste à appliquer un effort d'arrachement par l'intermédiaire d'un poinçon (figure 15).

Cet essai global quantifie la qualité de l'interface (amplitude et densité des ondes le long de la zone soudée).

a) Principe et logique des signaux visualisés sur l'oscilloscope



b) Etalonnage des signaux et visualisation sur enregistrements

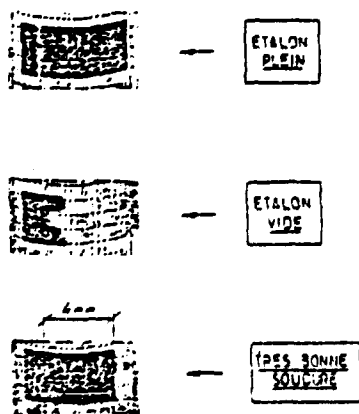


Figure 13 - CONTRÔLE ULTRASONORE DES SOUDURES PAR MAGNETOSOUDEGE

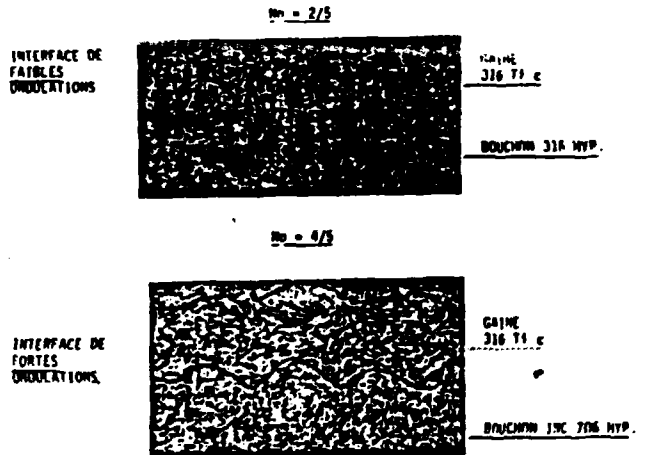


FIGURE 14 - EXAMENS METALLOGRAPHIQUES DES INTERFACES DE QUELQUES SOUDURES TESTÉES

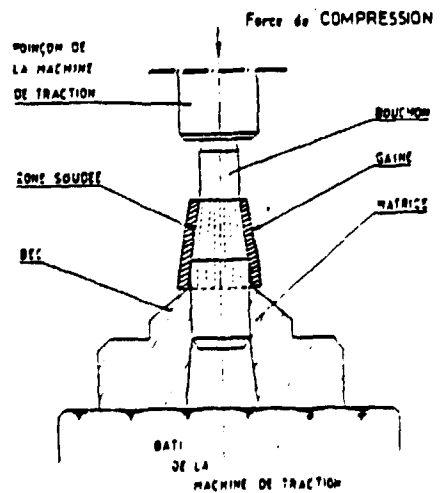


FIGURE 15 - PRINCIPE DU TEST D'ÉPLUCHAGE

c) Caractérisation

De manière à porter un jugement de valeur sur cette liaison "peu habituelle" dans le domaine du soudage, nous avons mis en oeuvre des essais de caractérisation par :

- essais de traction à température ambiante et à haute température 600°C et 700°C ;
- essais de fluage par pression interne de 600°C à 700°C ;
- essais de cyclage thermique 300°C à 600°C sur des éprouvettes pressurisées ;
- essais en fatigue par torsions alternées.

Dans tous les cas la rupture s'est localisée dans la partie courante des éprouvettes en dehors de la zone soudée I.E.

d) Analyse des résultats de contrôle

Une analyse comparative des résultats de contrôles et des enregistrements des paramètres électriques lors du soudage nous a montré que, dans tous les cas de rebut, sur une fabrication de 600 soudures, on constatait une anomalie sur le courant de décharge.

La majorité de ces défauts lors des tirs était imputable à la qualité d'isolement des bobines.

Par conséquent il est raisonnable de penser qu'un dispositif informatique d'analyse, de traitement et de stockage des signaux électriques permettrait de donner une réponse quasi instantanée sur la santé de la soudure.

6- CONCLUSION

Le procédé de soudage développé dans cette étude, a conduit à la réalisation de jonctions entre diverses nuances d'aciers inoxydables sur des éléments tubulaires de dimensions relativement limitées, spécifiques des aiguilles combustibles de la filière des réacteurs à neutrons rapides.

Ce travail a abouti à la mise au point d'un procédé de soudage à l'état solide qui répond au problème de l'élaboration de jonction saine entre matériaux insoudables, par les procédés conventionnels. Les connaissances acquises nous laissent entrevoir les possibilités d'application du magnétosoudage à des fabrications de haute technicité d'éléments tubulaires de géométrie moyenne. Mais pour cela la méthode devrait évoluer quelque peu, de façon à la rendre plus industrielle. Un certain nombre d'innovations technologiques s'avèrent nécessaires, tant du point de vue générateur que de la bobine.

L'exploitation de ces connaissances a donné lieu à la préparation d'un cahier des charges d'une nouvelle génération de générateurs de hautes performances à énergie élevée libérée dans un temps très court < 10 μ secondes. Ce type de générateur est conçu pour recevoir des bobines permanentes et apportera un atout majeur au procédé. Des essais ont eu lieu sur un prototype que nous avons fait réaliser par la société Barras Provence avec l'aide de l'ANVAR.

R E F E R E N C E S

- [1] WF BROWN, J. BANDAS, T. OLSON
Pulsed Magnétique Welding of breeder reactor
Fuel pin end Closures.

- [2] H. GALLIZZI
Etude et application des champs magnétiques
intenses au soudage d'éléments tubulaires en
aciers inoxydables.
1986 Rapport CEA - R - 5355

- [3] G. BIRKHOFF, D.P. MAC DOUGALL,
E.M. PUGH, G. TAYLOR
Explosives with lined cavities
1948 J. App. phys. 3ⁿ (928-939)

- [4] B. CROSSLAND
Explosive welding of metals and
its application (OXFORD SCIENCE
PUBLICATIONS) 1982.

- [5] GR COWAN, OR BERGMAN
AH HOLTZMANN
MECHANIS: of band zone wave formation
in explosive - clad metals
1971 Met trans 2, 3145, 3155.

- [6] R. P. DEBEIR
La soudabilité par plaquage.
Soudure par action d'un champ magnétique
et par effet électrohydraulique
1980 Revue de Mécanique N°76