

2
COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

CENTRE D'ETUDES NUCLEAIRES DE SACLAY
Service de Documentation
F91191 GIF SUR YVETTE CEDEX

CEA-CONF -- 8562

MI

PRINCIPAUX MODES DE RUPTURES RENCONTRES DANS L'EXPERTISE
DES COMPOSANTS AVANCES

PRINCIPAL MODES OF RUPTURE ENCOUNTERED IN EXPERTISE
OF ADVANCED COMPONENTS

TAVASSOLI, A.A.; BOUGAULT, A.

CEA CEN Saclay, 91-Gif-sur-Yvette
(France). IRDI, DMECN, DTech

Communication présentée à : 5. International conference on reliability and
maintainability
Biarritz (France)
6-10 Oct 1986

PRINCIPAUX MODES DE RUPTURES RENCONTRES DANS L'EXPERTISE DES COMPOSANTS AVANCES
PRINCIPAL MODES OF RUPTURE ENCOUNTERED IN EXPERTISE OF ADVANCED COMPONENTS

A.A. TAVASSOLI et A. BOUGAULT

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE / CENTRE D'ETUDES NUCLEAIRES DE SACLAY
DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE / SRMA
91191 GIF SUR YVETTE CEDEX - FRANCE

RESUME

Les aspects de rupture de plusieurs composants métalliques expertisés peuvent être classés dans deux catégories : intergranulaire ou transgranulaire selon leur principal mode de rupture.

Les ruptures intergranulaires rencontrées, outre celles attribuées aux phénomènes de fluage et de corrosion, sont souvent imputables à la ségrégation d'impuretés aux joints de grains. Trois exemples sont cités où ce phénomène s'est produit : l'un est un acier (1.25 Cr - 0.5 Mo) utilisé dans l'industrie pétrochimique, un second sur des fils de nickel utilisés pour l'instrumentation des circuits électroniques à haute température et un dernier sur un acier (A 508 Cl 3) de cuve de réacteur à eau pressurisée. Ce type de ségrégation et en conséquence la fragilisation intergranulaire qui lui sont associées sont souvent réversibles.

Les ruptures transgranulaires examinées, outre celles associées à une rupture ductile ou par corrosion sont essentiellement imputables au clivage ou à la fatigue. Ce dernier mode de rupture constitue le mode de défaillance le plus courant pour des composants soumis à des chargements cycliques en transitoire (thermiques notamment). Un exemple de ce type de rupture est présenté. Elle s'est produite dans un mélangeur de sodium qui recevait des sollicitations thermiques.

Dans certains cas plus d'un mécanisme d'endommagement peuvent être rencontrés et le phénomène observé peut être aggravé par corrosion. Deux exemples de fissuration par corrosion sous contrainte et sensibilisation intergranulaire sont présentés.

Enfin un exemple est cité où à l'aide des mesures d'interstries on remonte au chargement à l'origine de sollicitations cycliques.

ABSTRACT

Failure of many metallic components investigated can be classified into two categories : intergranular or transgranular according to their principal mode of rupture.

Intergranular ruptures other than those related to creep or corrosion phenomena have been found to be often provoked by segregation of impurities at the grain boundaries. Three examples are cited where this phenomenon occurred, one is a steel (2.25 Cr - 0.5 Mo) used in petrochemical industry, another is a nickel used for instrumentation of electrical circuits at elevated temperatures and the last is a steel (A 508 cl 3) used for PWR vessel. This type of segregation and hence its associated grain boundary embrittlement is usually reversible.

Intergranular failures, other than those characterized by ductile failure, have been found to be in general induced by cleavage, corrosion or fatigue. The latter type of rupture constituted the most frequently encountered mode of failure in the advanced components operating under thermal or load transients. One example is cited for this type of failure. It was produced in a sodium mixer which was subjected to thermal loadings.

In some cases more than one damaging mechanism was found and often the observed phenomenon was aggravated in presence of a corrosive environment. Examples of stress corrosion and intergranular sensitization failures are cited.

Finally an example is given where by means of striation measurements the cyclic loads at the origin of the failure is estimated.

I. INTRODUCTION

L'objet principal des expertises est de déterminer les causes d'avaries ou d'anomalies produites en service ou en fabrication des appareils industriels. En particulier, dans le cas de la défaillance d'un matériau par rupture ou fissuration, il sera essentiel de séparer ce qui est du fait du matériau de ce qui est du fait des conditions de service de ce matériau. Cette recherche des causes d'avaries devrait s'appuyer sur plusieurs disciplines, mais l'examen des faciès de rupture reste l'un des éléments clé de ces analyses.

Bien que l'interprétation de ce que l'on observe sur une surface de rupture nécessite certaines pratiques et compréhension du mécanisme de rupture, les indices de bases d'un mode particulier de rupture sont facilement reconnus. Le diagramme ci-dessous en présente un exemple.

Les informations obtenues de ces observations et en particulier leur corrélation avec les stades d'amorçage et propagation permettent souvent d'identifier la principale cause d'une défaillance et donc des mesures à prendre pour éviter des situations semblables.

Dans ce document nous présentons plusieurs cas où les examens fractographiques ont joué un rôle clé dans l'identification de la cause principale d'avaries recherchées.

II. METHODES EXPERIMENTALES

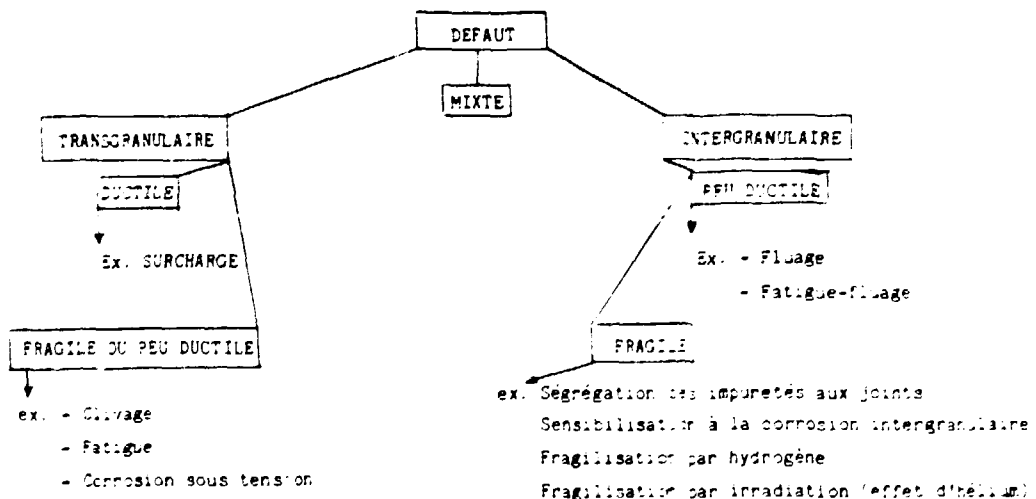
Les séquences expérimentales à suivre pendant une expertise dépend de la nature de la défaillance. Cependant deux précautions préalables sont nécessaires pour toutes expertises.

1. Echantillon prélevé doit être entièrement représentatif de la zone endommagée.
2. Les surfaces de défaut doivent être gardées aussi intactes que possible.

Lors de l'expertise, on choisit généralement des séquences d'examen allant du plus global au plus détaillé avec des moyens qui augmentent la finesse d'examen, mais qui réduisent le champ. De plus, tous examens destructifs sont poussés vers la fin d'étude pour éviter la perte inattendue d'information.

Les séquences que nous avons habituellement employées dans nos expertises sont présentes ci-après :

1. Recueil de données des problèmes comprenant celles relatives au matériau, fabrication et conditions de service.
2. Les examens visuels in situ, directs ou indirects
3. Photographies et relevés dimensionnels
4. Examens à la loupe binoculaire in situ ou sur pièce.
5. Mesures de microdureté.



6. Sélection, identification, préservation et préparation d'échantillon pour examens métallographiques et fractographiques.
7. Examens métallographiques
8. Examens fractographiques avant et après nettoyage de rupture.
9. Analyse chimique globale et locale
10. Examens complémentaires
 - Essais mécaniques
 - Spectrométrie Auger
 - Microscopie électronique à transmission avec microanalyse.
11. Calcul d'endommagement subi en service, et comparaison des résultats obtenus avec les hypothèses avancées ou conclusions tirées des examens et d'essais effectués en particulier à l'aide de mécanique de la rupture.
12. Conclusions finales et recommandations pour résoudre le problème.

III - EXEMPLES

III.1 - RUPTURES TRANSGRANULAIRES

III.1.1 - Ductile

Les ruptures ductiles sont caractérisées par la présence de cupules de déformation sur le faciès de rupture. Les figures 1a et 1b montrent un exemple de celle-ci pour un joint soudé.

Ce type de rupture a souvent pour cause une surcharge au-delà de la résistance du matériau.

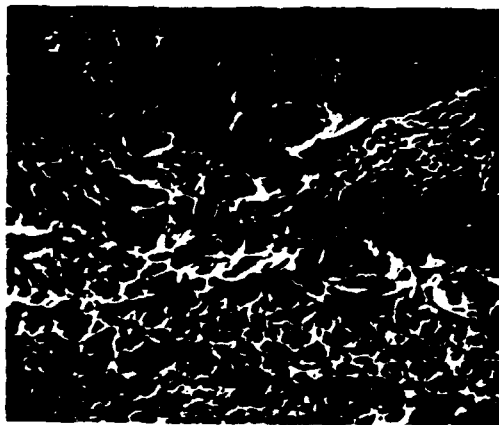


Fig. 1a - Rupture ductile du métal de base
(Acier 304 L rompu à l'ambiante)

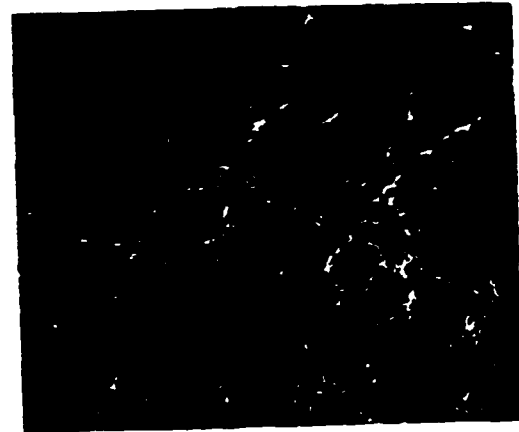


Fig. 1b - Rupture ductile du métal soudé
(métal d'apport 308 L rompu à l'ambiante)

III.1.2 - Fragile ou peu ductile

Les ruptures transgranulaires peuvent être accompagnées de peu ou pratiquement pas de déformation plastique.

1. Le cas le plus connu de rupture fragile est la rupture par clivage des aciers ferritiques aux basses températures. La figure 2a montre un exemple de celle-ci. Elle est observée sur une éprouvette de résilience prélevée dans un acier A 508 cl 3 (16 MND 5) et testées à -180°C . Le faciès de cassure est caractérisé par des facettes clivées.

Ce type de rupture a souvent pour cause un chargement rapide à une température inférieure à la température de transition du métal.

2. Un exemple de rupture transgranulaire qui est accompagné de peu de déformation plastique est celle provoquée par la fatigue. Le faciès de rupture est caractérisé dans ce cas par des fonds d'arrêt, des gradins et en particulier des stries de fatigue. La figure 2b en montre un exemple. Il s'agit du faciès de rupture d'un défaut observé dans un mélangeur de sodium, où la paroi du mélangeur a subi des sollicitations alternées d'origine thermique. Les mesures d'interstries sur cette figure permettent de déterminer le sens et la vitesse de propagation de la fissure.

Ce type de rupture signifie un chargement alterné d'origine mécanique ou thermique ou parfois les deux.

3. Les aciers inoxydables austénitiques, ont une structure cubique face centrée et de ce fait, ne sont pas sensibles à une rupture par clivage. Cependant, ils peuvent se rompre sans déformation importante s'ils sont soumis à des contraintes dans un milieu corrosif.

La figure 2c présente l'aspect de défaillance d'un trou fileté rompu par corrosion sous tension. Le métal de la pièce est un acier inoxydable austénitique à 19 Cr - 10 Ni à très bas carbone (304 L, 22 CN 18.10) et le milieu corrosif provient de l'interaction du sodium liquide avec l'humidité restante dans le filetage.

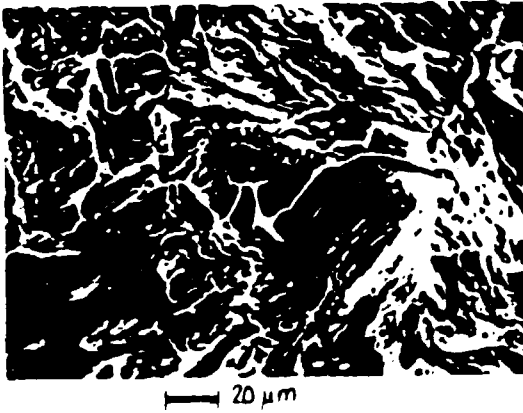


Fig. 2a - Eprouvette de résilience en acier A 508-ci 3 (16 MND 5, acier faiblement allié) rompu à - 80 °C mettant en évidence l'aspect typique du clivage.



Fig. 2b - Défaut observé dans un mélangeur de sodium, fabriqué en acier inoxydable austénitique mettant en évidence des stries de fatigue.

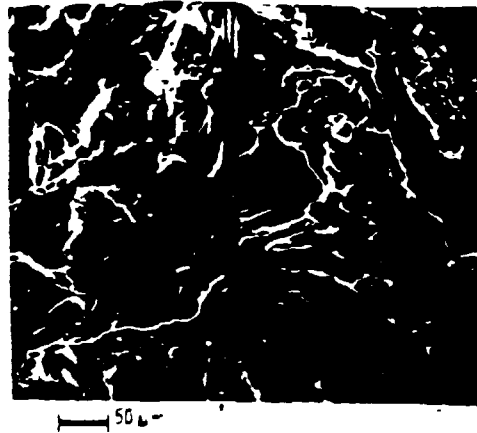


Fig. 2c - Le trou fileté dans l'acier type 304 (22 CN 18.10) mettant en évidence un processus de corrosion sous tension.

III.2 - RUPTURES INTERGRANULAIRES

III.2.1 - Peu ductile

Les ruptures intergranulaires sont rarement ductiles et les déformations qui leurs sont propres sont peu importantes par rapport à celles de ruptures transgranulaires ductiles. Néanmoins certaines ruptures intergranulaires sont précédées d'une déformation non négligeable aux joints de grains.

Les trois figures suivantes 3a, 3b et 3c montrent trois cas de ruptures intergranulaires qui peuvent être considérées dans cette catégorie. Les trois figures mettent en évidence que la rupture s'est précédée par une déformation plastique non négligeable du métal.

III.3.2 - Fragile

Plusieurs phénomènes peuvent provoquer une rupture.

1. La microségrégation des impuretés aux joints de grains au bords de soudure, en particulier des grosses pièces, ou au cours du fonctionnement à des températures élevées est l'une des causes importantes.



Fig. 3a - Rupture intergranulaire d'un fil de nickel moins fragilisé que celui présenté dans la figure 4b.

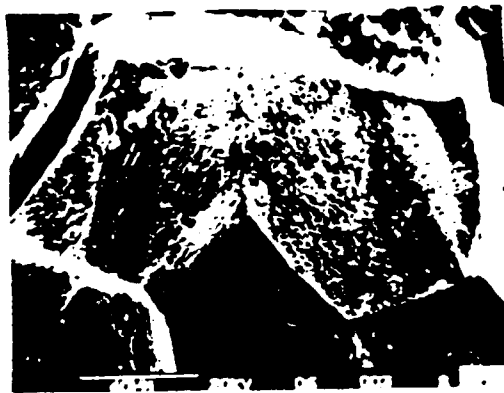


Fig. 3b - Rupture intergranulaire d'un acier inoxydable austénitique en fluage mettant en évidence la présence des microcavités aux joints des grains.

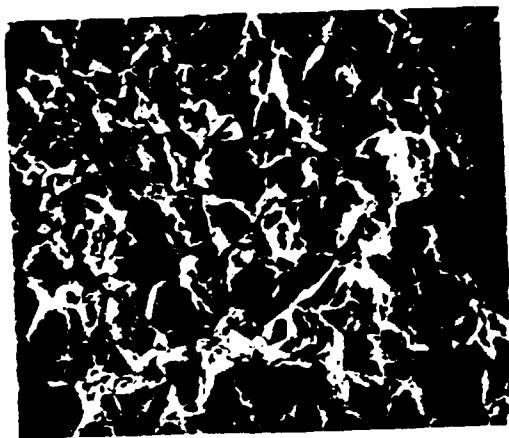


Fig. 3c - Acier inoxydable austénitique rompu, à une température élevée (rupture mixte), irradié.

Les figures 4a, 4b, et 4c en montrent trois exemples.

Le premier est celui d'un acier ferritique (1,25 Cr - 1,5 Mo) provenant de l'unité catalytique d'une raffinerie ayant fonctionné plusieurs années à environ 535 °C.

Le deuxième est le cas des fils de nickel utilisés comme détecteur de fuite de sodium à environ 530 °C.

Le troisième est celui de la ZAT d'une tubulure de la cuve des réacteurs à eau pressurisée (A 508 cl 3) volontairement fragilisée par un traitement de "Step Cooling".

La fragilisation dans les trois cas est due à la ségrégation des impuretés notamment P et S, aux joints de grains. Ce type de fragilisation est en général réversible. Par exemple un traitement thermique d'une heure à 625 °C a permis de défragiliser l'acier ferritique provenant de la raffinerie.

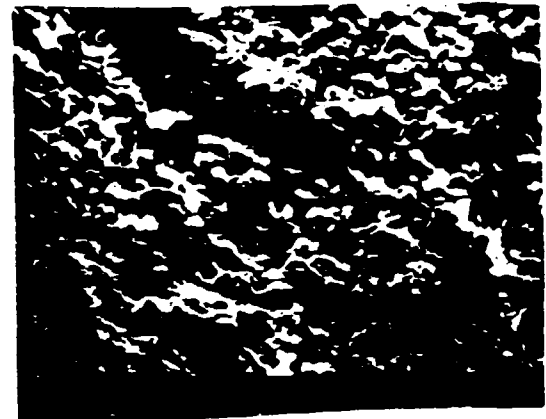


Fig. 4a - Acier 1,25 Cr - 0,25 Mo fragilisé après plusieurs années de fonctionnement à environ 535 °C.

2. La sensibilisation à la corrosion intergranulaire des aciers inoxydables austénitiques peut également provoquer une rupture fragile. Cette sensibilisation est due à la précipitation des carbures riches en chrome, tels que les carbures de chrome dans les nuances à teneurs en carbone élevées qui diminue la quantité de chrome dans les zones adjacentes aux précipités.



Fig. 4b - Fil de nickel fragilisé par fonctionnement à 550 °C. L'élément fragilisant est le soufre (à comparer avec la fig. 3a).

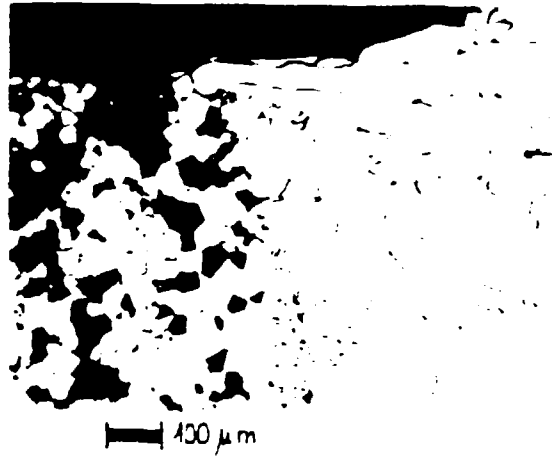
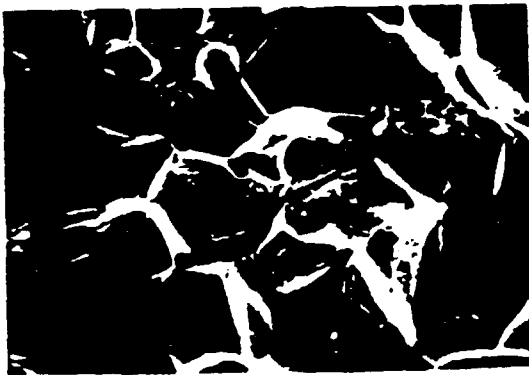


Fig. 5a



400 μm

Fig. 4c - La ZAT d'acier A 508 cl 3 volontairement fragilisé par "Step Cooling". Phosphore étant l'élément fragilisant le plus marqué (essai à 20 °C).



Fig. 5b

Fig. 5a et 5b - Rupture d'un acier 304 sensibilisé à la corrosion intergranulaire après plusieurs années de fonctionnement à des températures comprises entre 400 et 530 °C.

La figure 5 montre un exemple de ce type de rupture produite lors de décontamination dans des feuillards en acier 304 (25 CN 18.10) qui avaient fonctionné pendant plusieurs années à des températures comprises entre 400 et 530 °C.

3. L'irradiation peut également provoquer une rupture intergranulaire. Ceci est parfois à cause du bouchon de l'hélium aux interfaces des grains ou dendrites. La figure 6 montre un exemple de rupture interdendritique observée sur un métal soudé (308 L) après une faible dose d'irradiation neutronique.

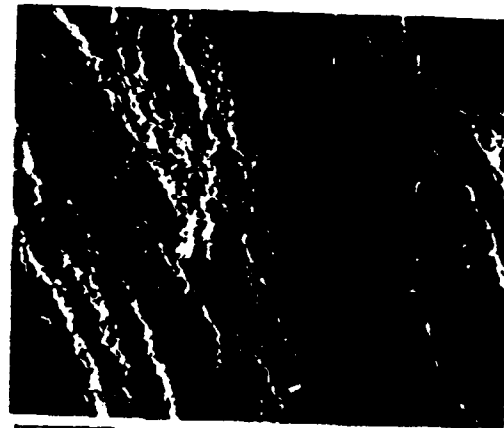


Fig. 6 - Rupture interdendritique du métal déposé (308 L irradié à environ 1 dpa) produite lors d'essais de traction à chaud.

III.4 - DETERMINATION DU CHARGEMENT

Les informations obtenues des informations fractographiques peuvent permettre dans certains cas de remonter au chargement à l'origine du défaut.

La figure 7 illustre le principe de cette méthode pour une pièce rompue en fatigue.

Partant d'une longueur de fissure et d'une vitesse de fissuration da/dN mesurée par interstries, on remonte à la variation du facteur d'intensité de contrainte ΔK , et connaissant la longueur de fissure au chargement P .

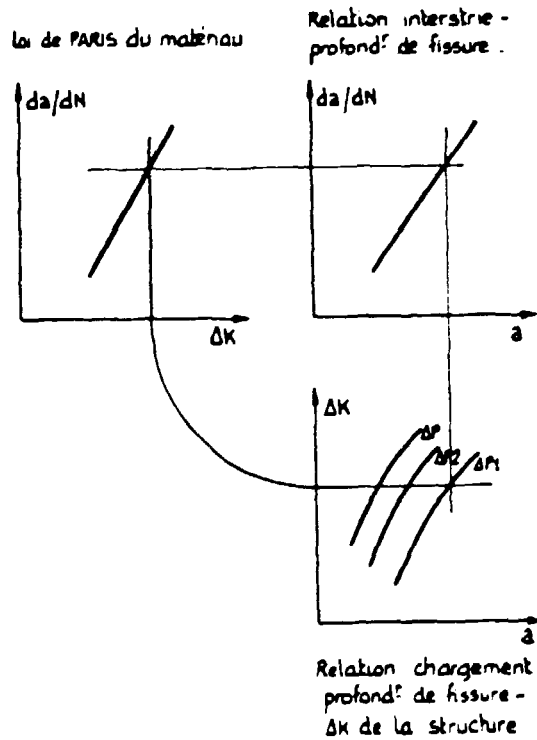


Fig. 7 - Principe de la méthode de l'évaluation des chargements en fatigue.

IV - CONCLUSIONS

Les différents exemples présentés dans ce papier démontrent que l'expertise métallurgique d'une avarie est un moyen efficace pour identifier la cause de celle-ci et les mesures à prendre pour éviter sa répétition. Ils montrent également qu'il peut s'avérer nécessaire d'employer un large éventail de moyens d'examen au cours d'une expertise, mais que l'étude des faciès de rupture joue la plupart du temps un rôle clé.