

LA RUPTURE

des matériaux

Clément LEMAIGNAN



MOYENS D'EXAMEN

PHÉNOMÈNES GÉNÉRATEURS DE DÉFAUTS

MÉCANISMES PHYSIQUES DE RUPTURE

CONDUITES À TENIR

CALCULS DES DURÉES DE VIE

La rupture des matériaux

Clément Lemaignan



17, avenue du Hoggar
Parc d'Activité de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

ISBN : 2-86883- 642-9

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2003

Table des matières

| | |
|--|------------|
| Avant-propos | VII |
| 1 • Introduction | 1 |
| 2 • Les défauts métallurgiques..... | 3 |
| Les processus métallurgiques générateurs de défauts | 4 |
| La mise en forme et les traitements thermiques | 14 |
| Le suivi des défauts : le contrôle non destructif | 18 |
| L'évolution des défauts | 25 |
| 3 • Les moyens de caractérisation des ruptures..... | 27 |
| La fractographie | 27 |
| Le microscope électronique à balayage | 29 |
| 4 • Les perturbations locales des contraintes induites par les singularités géométriques | 33 |
| Les concentrations de contraintes | 33 |
| Le facteur d'intensité de contraintes..... | 36 |
| La propagation d'une fissure | 43 |
| L'évaluation des contraintes et déformations en régime élasto-plastique – Intégrale de Rice | 45 |
| 5 • La rupture théorique entre atomes | 47 |
| Le calcul de la contrainte théorique de rupture | 47 |
| 6 • La rupture ductile..... | 51 |
| Le développement de la striction..... | 51 |
| Les concentrations de contraintes autour des inclusions..... | 53 |
| Le développement des cavités et la formation des cupules..... | 55 |
| 7 • Le clivage et les ruptures fragiles | 57 |
| L'amorçage d'un clivage | 57 |
| L'essai Charpy (ou de résilience)..... | 60 |
| La fragilisation intergranulaire | 63 |
| Approche statistique de la rupture | 64 |

| | |
|--|------------|
| 8 • La zone plastique en fond de fissure | 67 |
| Les conditions de déformation plane | 67 |
| La zone plastique en tête de fissure | 68 |
| La zone plastique d'Irwin | 69 |
| Géométrie détaillée de la zone plastique | 69 |
| Géométrie tridimensionnelle de la zone plastique | 70 |
| Distribution des contraintes dans la zone plastique | 73 |
| <hr/> | |
| 9 • La ténacité | 75 |
| La mesure du K_{IC} | 75 |
| Autres mesures de ténacité | 80 |
| La ténacité des céramiques | 84 |
| Les ratio analysis diagrams (RAD) | 85 |
| <hr/> | |
| 10 • La fatigue | 87 |
| La fatigue dans le domaine élastique : les courbes de Wöhler | 88 |
| La propagation des fissures de fatigue | 93 |
| L'amorçage des fissures de fatigue | 97 |
| La fatigue oligocyclique | 101 |
| <hr/> | |
| 11 • La corrosion sous contrainte | 105 |
| Aspects généraux | 105 |
| L'amorçage en corrosion sous contrainte | 108 |
| Les mécanismes de propagation | 110 |
| Les méthodes d'essais en CSC | 111 |
| <hr/> | |
| 12 • Autres ruptures fragiles | 113 |
| La fatigue-corrosion | 113 |
| La fragilisation par l'hydrogène | 116 |
| Les sollicitations en température et le fluage | 118 |
| La fatigue en température | 119 |
| La fatigue thermique | 121 |
| La fragilisation par les métaux liquides (FML) | 122 |
| <hr/> | |
| 13 • La rupture des polymères | 125 |
| Structure et déformation des polymères | 125 |
| La formation des craquelures | 127 |
| Les modes de rupture des polymères | 129 |
| <hr/> | |
| 14 • Les conduites à tenir | 131 |
| La détection d'une fissure | 131 |
| Le suivi de la propagation des fissures | 132 |
| L'évolution du matériau | 133 |
| <hr/> | |
| Annexes | 135 |
| A1 Évaluation des singularités de contraintes | 135 |
| A2 Fissure dans la paroi d'un tube sous pression | 136 |

Avant-propos

L'objet du présent ouvrage est de fournir une vision globale des phénomènes responsables de la ruine de matériaux de structure. Ceux-ci revêtent en effet une importance considérable puisque, peu ou prou, ils vont déterminer la durée de vie ou la disponibilité d'un composant, d'un assemblage et, par enchaînement, d'une installation industrielle complète.

Cet ouvrage est donc principalement destiné à des étudiants ou des ingénieurs déjà familiarisés avec la science des matériaux et qui voudraient approfondir les phénomènes spécifiques conduisant à la rupture, tout en ayant une vision globale de leur variété. Par cette lecture, ils pourront acquérir une connaissance fine, mais la plus complète possible, des mécanismes de rupture, développant ainsi une capacité à prévenir les défaillances par la connaissance des conditions qui leur donnent naissance. De plus, en cas de rupture en service, ils pourront, par l'examen des pièces rompues, déterminer, et donc combattre, les causes de ruine.

La rédaction de ce livre a pour origine la synthèse d'un enseignement prodigué depuis plus de vingt ans sur ce thème à l'Institut National Polytechnique de Grenoble. L'auteur s'est volontairement limité à une présentation qualitative des phénomènes, réduisant au minimum les développements mathématiques, pour privilégier les implications concrètes et les illustrer par des cas réels à caractère pédagogique. Pour des développements plus détaillés, une bibliographie propose une série d'ouvrages en vue de l'éventuel approfondissement d'un mécanisme particulier.

Cette page est laissée intentionnellement en blanc.

Si les ruptures n'existaient pas, les ingénieurs seraient pratiquement inutiles et chacun pourrait construire un pont, un avion ou une maison sans le moindre risque de destruction de la structure. *A contrario*, nous ne pourrions partager le pain, ni réduire en poudre des médicaments ou découper une vitre au diamant sans la réalité de ruptures aisées sur de nombreux matériaux.

Le contrôle de l'occurrence, ou non, de ruptures dans des objets courants est essentiellement lié à la conception de ces objets. Au début de l'ère industrielle, la "force des métaux" avait bien été quantifiée par des grandeurs extensives, et des défauts responsables de ruptures localisées avaient été identifiés. La mauvaise connaissance de leur géométrie, et surtout de leurs effets, avait conduit à l'utilisation de "coefficients de sécurité" dont la valeur relevait d'une approche empirique confortée par l'usage.

Un certain nombre d'accidents spectaculaires, dans tous les domaines de l'activité humaine (par exemple voir la figure 1.1) a conduit rapidement à se pencher sur tous les mécanismes pouvant conduire à rupture. Ces approches sont maintenant étendues à l'ensemble des processus industriels, à toutes les échelles, y compris les plus fines comme celles de la micro-électronique (Fig. 1.2). Parallèlement, l'étude fine des aspects mécaniques, liés à la présence des défauts, a connu un développement majeur, donnant naissance à une nouvelle discipline, la mécanique de la rupture.

Aujourd'hui les techniques de contrôles industriels non destructifs et la possibilité d'évaluer l'impact des singularités géométriques des défauts sur les sollicitations locales permettent de vivre sans risques avec des défauts répertoriés dans des assemblages, et ce pour les conditions attendues d'utilisations qui peuvent être très variables.

L'objet du présent ouvrage est d'introduire aux concepts et méthodes modernes qui permettent de contrôler les conditions de développement des ruptures dans les composants industriels.

On se penchera successivement sur les moyens utilisés pour examiner les ruptures, les mécanismes à l'origine des défauts dans les structures et les concepts mécaniques permettant de quantifier les sollicitations locales qu'ils induisent (mécanique de la rupture), avant de détailler les divers mécanismes

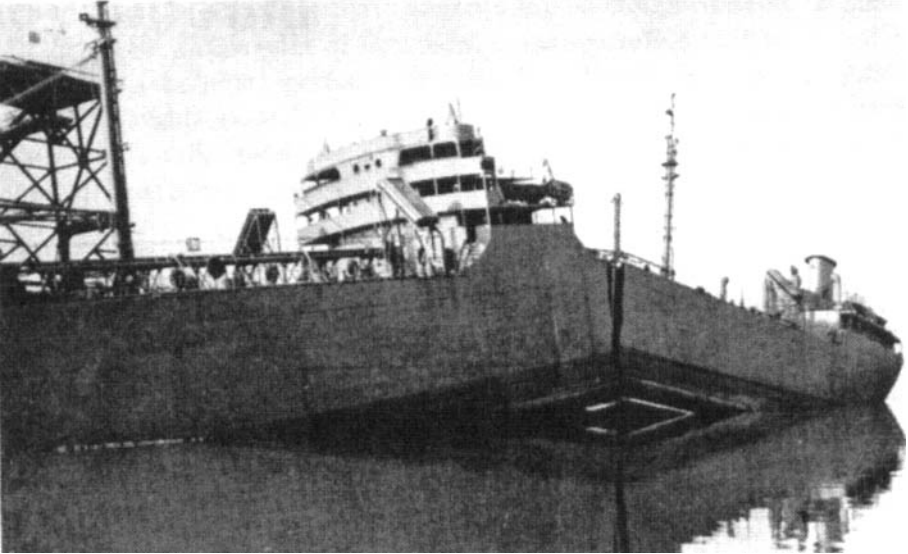


Fig. 1.1. Liberty ship "Schenectady" rompu à quai le 24 janvier 1943, par une température de -6°C .

physiques conduisant à la rupture d'une pièce donnée : rupture théorique, rupture ductile, clivage, déchirement, fatigue et effets d'environnement : corrosion sous contrainte, fatigue corrosion, fragilisation par l'hydrogène, fluage...

Les matériaux considérés seront principalement des métaux, mais on ne s'interdira pas des détours par les céramiques, les verres ou les polymères.

On terminera par les conduites à tenir en présence de défauts, les méthodes de calculs de durée de vie et la prévention.

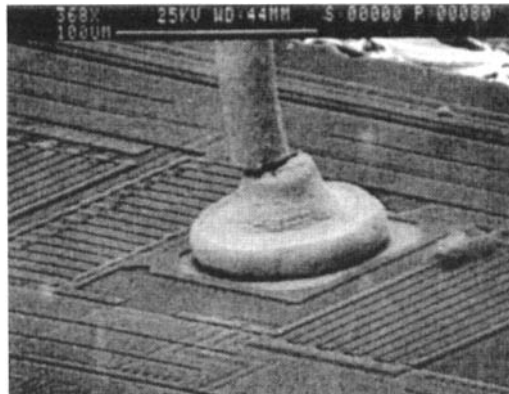


Fig. 1.2. Exemple de rupture à l'échelle micronique : rupture d'un fil de contact sur un microprocesseur.

Les défauts métallurgiques

Les défauts sont présents dans pratiquement toutes les structures métalliques, ils apparaissent lors de la fabrication essentiellement. À la solidification, les variations de volume, de température et de composition, induisent des séries de défauts, les soudures exacerbent les mêmes phénomènes. L'usinage et les traitements thermiques peuvent être à l'origine de fissurations dans l'état final des pièces. Pour contrôler l'état d'une structure, les méthodes de contrôle non destructif permettent de déterminer l'existence et la géométrie de défauts.

Les techniques de radiographie ou de contrôle ultrasonore donnent ces informations à cœur, tandis que les techniques de courants de Foucault, la magnétoscopie ou le ressuage donnent des informations sur les défauts proches de la surface ou débouchant.

La notion de défaut est à la fois assez intuitive et très imprécise. "Imperfection physique, partie imparfaite et qui ne possède pas les qualités requises" précise le Robert. Une telle définition souligne combien la caractérisation d'un défaut n'est en rien absolue, mais relative à l'usage que l'on veut faire de la pièce ou de l'assemblage où il est présent. Une sémantique moderne permet de réduire le flou d'une telle approche. Elle ne sera pas détaillée ici et l'on se limitera seulement à détailler les principales origines des défauts et les moyens de les caractériser.

Ainsi, la pureté chimique, la structure cristalline, l'état de surface ou la présence de certaines inclusions auront une importance très différente selon qu'on utilise un métal pour ses propriétés électroniques, magnétiques, mécaniques ou de résistance à la corrosion. Ce qui pourra être considéré comme un défaut grave pour une application donnée sera parfois un avantage pour un autre usage. De même, les diverses parties d'un assemblage n'étant pas soumises aux mêmes sollicitations, ni au même environnement, un défaut présent à un endroit donné pourra nécessiter une reprise avant remise au client alors que, situé différemment dans la pièce, il sera considéré comme insignifiant.

Lors de tout contrôle de pièce, il est donc nécessaire de définir ce qui caractérise un défaut, c'est-à-dire une condition qui, reliant sa taille, sa géométrie, son emplacement et éventuellement son origine, précise son danger potentiel.

La liaison entre le contrôle et la conception devra donc être très étroite pour séparer ce qui est défaut de ce qui ne l'est pas. Elle devra être au moins aussi forte avec la fabrication pour comprendre la genèse des défauts et y porter remède.

L'objet de ce chapitre est de présenter quelques notions générales sur l'origine et l'évolution des défauts dans les pièces métalliques, afin de faciliter le dialogue

entre ceux qui réalisent les contrôles ou utilisent les pièces, et ceux qui les ont conçues ou en ont réalisé les composants.

Les processus métallurgiques générateurs de défauts

La solidification

La quasi-totalité des métaux utilisés industriellement sont passés, à un moment donné de leur histoire, par l'état liquide à des fins d'élaboration ou de mise en forme. Lors de la solidification, divers phénomènes physiques, dont les conséquences seront variées, se manifestent et marquent le métal. Il en gardera la trace, souvent même après plusieurs autres transformations thermomécaniques.

Trois propriétés physiques particulières des métaux et alliages interviennent toujours lors de la solidification. Ce sont des caractéristiques intrinsèques de la transformation liquide – solide, dont il faut chercher à atténuer les conséquences.

La différence de solubilité des éléments d'alliage

Premièrement, la solubilité des éléments d'alliages est généralement très différente dans le solide et le liquide. En particulier, pratiquement toutes les impuretés et les constituants mineurs des alliages sont plus solubles dans le liquide que dans le solide. Lors de la progression du front de solidification, le solide qui se forme est plus pur que le liquide qui lui donne naissance. Le liquide s'enrichit donc progressivement en constituants mineurs. Le gradient de concentration qui en résulte, entre les parties qui ont solidifié les premières et celles qui ont solidifié les dernières, est appelé la ségrégation.

De plus, le liquide s'enrichissant en soluté juste en avant du front de solidification, le gradient de concentration, créé dans le liquide, conduit à un mode de solidification instable. Le front de solidification n'est pas plan mais très perturbé et les cristaux se développent au sein du liquide de manière arborescente et enchevêtrée : ce sont les dendrites. À la fin de la solidification, le liquide restant, qui forme les zones interdendritiques, est fortement chargé en éléments mineurs, les concentrations locales d'impuretés pouvant être, pour de gros lingots, plusieurs fois supérieures à la composition nominale. Dans le cas des aciers, ceci est particulièrement important pour le soufre, l'étain ou le phosphore qui sont responsables de la fragilité de ces zones interdendritiques.

Le rejet des solutés lors de la solidification peut conduire à dépasser, dans le liquide, la limite de solubilité d'un élément particulier. Dans le cas des gaz, il se forme des bulles qui restent prisonnières de l'enchevêtrement des dendrites.

On obtient alors des soufflures. Dans certaines conditions, la réaction de dégagement gazeux peut s'entretenir sur le front de solidification. Les soufflures sont alors très allongées et perpendiculaires aux isothermes. On évite ces défauts en réduisant la quantité de gaz dissous dans le métal liquide, soit par dégazage sous vide ou argon, soit par fixation de l'oxygène sur les oxydes.

La différence de masse volumique

La deuxième propriété physique à intervenir lors de la solidification est la différence de masse volumique entre le liquide et le solide. En général, celle-ci correspond à une contraction de l'ordre de 3 à 6 % lors de la solidification. En conséquence, un volume fermé d'alliage liquide que l'on laisse solidifier ne sera pas complètement comblé par le solide. La cavité restante est appelée une retassure.

Deux types de retassures existent : les retassures majeures (Fig. 2.1) affectent la partie supérieure des lingots ou des pièces moulées. On cherche à les diminuer par une opération de masselottage qui retarde la solidification de la partie supérieure. Les micro-retassures, elles, se forment lorsque l'enchevêtrement des dendrites isole une petite zone liquide du reste du lingot. Le retrait du liquide dégage alors une petite partie du squelette dendritique (Fig. 2.2). Lors du laminage ou du forgeage ultérieur, les soufflures et les micro-retassures qui ne débouchent pas vers l'extérieur se ressoudent car leur surface n'est pas oxydée. Elles restent cependant des zones de moindre résistance.

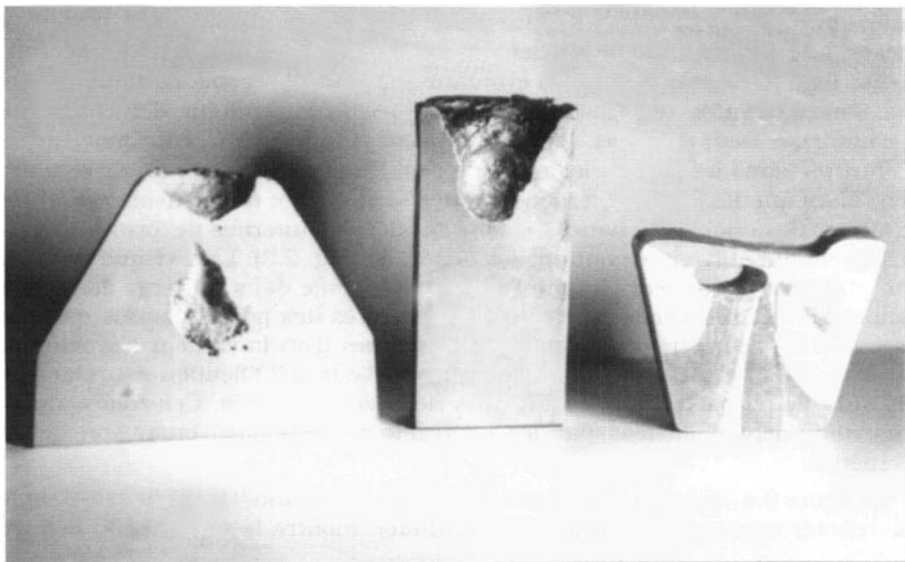


Fig. 2.1. Retassures dans des lingotins d'aluminium.

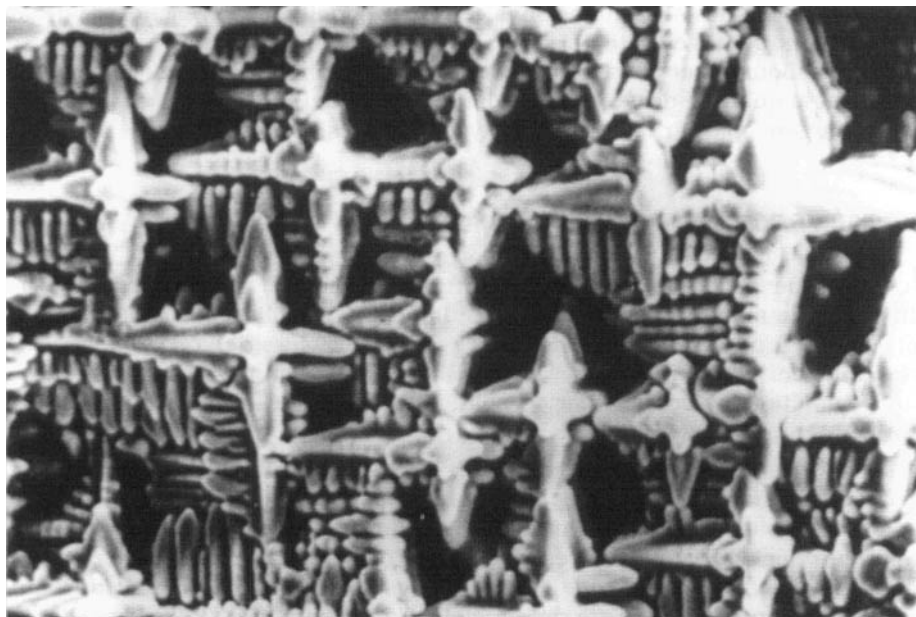


Fig. 2.2. Cavité dans une pièce solidifiée tapissée de dendrites.

Le gradient thermique pendant la solidification

Enfin, la solidification, libérant la chaleur latente de fusion, est toujours associée à un gradient thermique dans la partie solide. La valeur de ce gradient et la distribution des températures évoluant au cours de la solidification, les contractions différentes en chaque point du solide engendrent des contraintes thermiques. Des tensions locales peuvent induire des ruptures ou des déchirures dans les parties les plus fragiles. En particulier, en fin de solidification, alors que les zones interdendritiques sont encore mal consolidées, il peut se former des criques à chaud. Ce sont des défauts internes de formes très perturbées et qui suivent le contour des dendrites (Fig. 2.3). Leur risque de formation augmente fortement lorsque l'alliage se solidifie dans un large domaine de température. On les rencontre fréquemment près des points chauds qui, dans les moules à géométrie complexe, sont les zones d'où la chaleur s'évacue mal, par exemple une gorge ou un angle rentrant. Leur solidification est retardée et elle aura lieu à partir d'un liquide plus riche en impuretés. Ces zones sont, de plus, fortement sollicitées par les contraintes thermiques en raison de leur géométrie.

La figure 2.4, qui est la photo de l'empreinte Baumann⁽¹⁾ transversale d'un lingot refroidi très rapidement (coulée continue), montre la conjonction des trois

⁽¹⁾ Procédure d'attaque métallurgique qui révèle les concentrations locales en soufre.

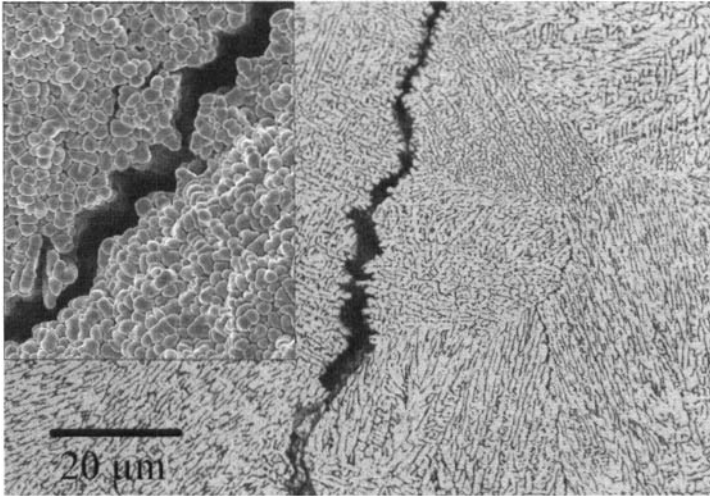


Fig. 2.3. Criques à chaud dans une soudure d'un alliage d'aluminium.

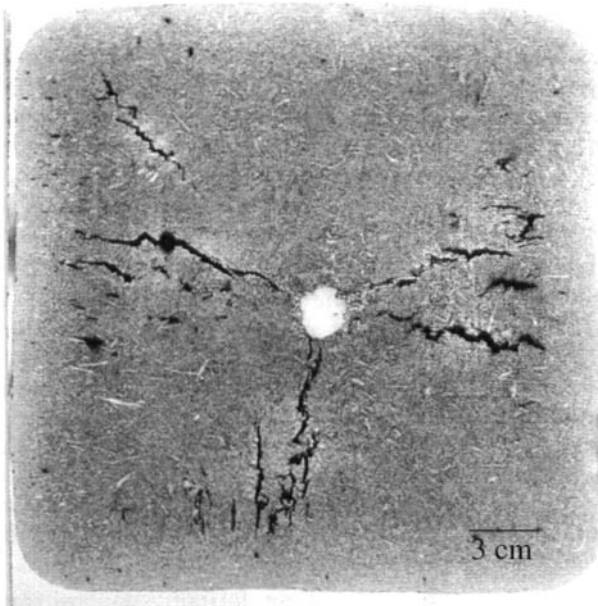


Fig. 2.4. Empreinte Baumann d'une billette de coulée continue (retassure centrale, criques et ségrégations...).

types de défauts décrits précédemment : ségrégations interdendritiques de soufre, retassure centrale et criques à chaud.

Un autre type d'accident de refroidissement ayant pour origine les contraintes thermiques est constitué par les tapures. Ce sont des fissures, souvent de grandes tailles, rectilignes et transgranulaires qui se produisent à basse température. Elles doivent leur nom au bruit important qui accompagne parfois leur formation. Elles sont dues à un refroidissement trop rapide, en particulier lors du passage des points de transformations dans les aciers trempants. Les tapures ne sont pas spécifiques de la solidification, mais de tout changement de température brusque. Lors d'un refroidissement, les parties externes sont en tension et les tapures sont débouchantes, alors qu'elles sont internes lors du chauffage.

Les inclusions

En plus des défauts déjà décrits et qui ont pour origine des phénomènes physiques qui apparaissent toujours lors de la solidification, d'autres défauts, d'origines variées, se matérialisent lors de cette étape de la fabrication. C'est en particulier à ce moment que les inclusions se fixent dans le métal. Ce sont des particules, généralement non métalliques et insolubles, qui ont été emprisonnées dans le front de solidification. On distingue deux grandes classes d'inclusions suivant leur origine.

Les inclusions exogènes sont dues à l'incorporation, au sein du métal liquide, de particules qui lui sont étrangères. Parmi les sources les plus fréquentes de telles particules, on trouve le laitier superficiel, partiellement entraîné lors de la coulée et des débris de réfractaires arrachés par le métal liquide de la surface des poches, fours et conduits. De plus, certaines réactions chimiques peuvent avoir lieu entre le métal liquide et les garnissages, en particulier avec les aciers à fort rapport Mn/Si. Lorsqu'elles n'ont pas décanté avant solidification, ces particules sont emprisonnées dans le métal et forment des inclusions souvent assez grandes et de formes perturbées, leurs compositions chimiques découlant de leurs origines (silicates, aluminates, etc).

Les inclusions endogènes se forment par réaction interne dans le métal liquide, lorsque l'évolution de la concentration de certains éléments, due à une addition ou à la ségrégation induite par la solidification, conduit à dépasser le produit de solubilité des constituants d'un composé chimique donné. On obtiendra ainsi des inclusions à partir des produits de réaction des additions de métal désoxydant avec l'oxygène dissous (Al_2O_3 , SiO_2 , Cr_2O_3 et leurs combinaisons). Ces inclusions, souvent sphériques, ont une taille qui peut varier de la fraction de micromètre à quelques dizaines de micromètres. Éventuellement, elles s'agglomèrent pour former des grappes, particulièrement dans le cas de l'alumine (Fig. 2.5).

Les inclusions à base de sulfures se forment généralement en fin de solidification, dans les zones interdendritiques où la conjonction de l'enrichissement en soufre et de l'abaissement de la température induit leur précipitation.

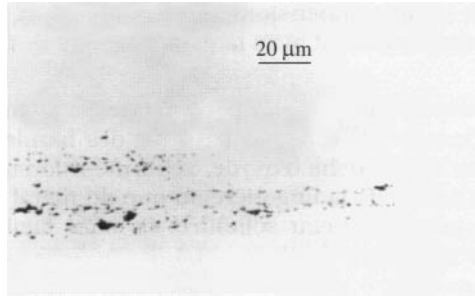


Fig. 2.5. Alignement d'inclusions dans un acier au carbone.

Autres incidents de coulée

Enfin, la solidification des lingots et pièces de fonderie peut être la source de défauts de surface mineurs : ainsi, les piqûres sont des défauts minuscules (en trou d'épingle) à la surface (Fig. 2.6). Elles ont pour origine le dégagement gazeux du réfractaire de moulage ou de la lingotière mal séchés.

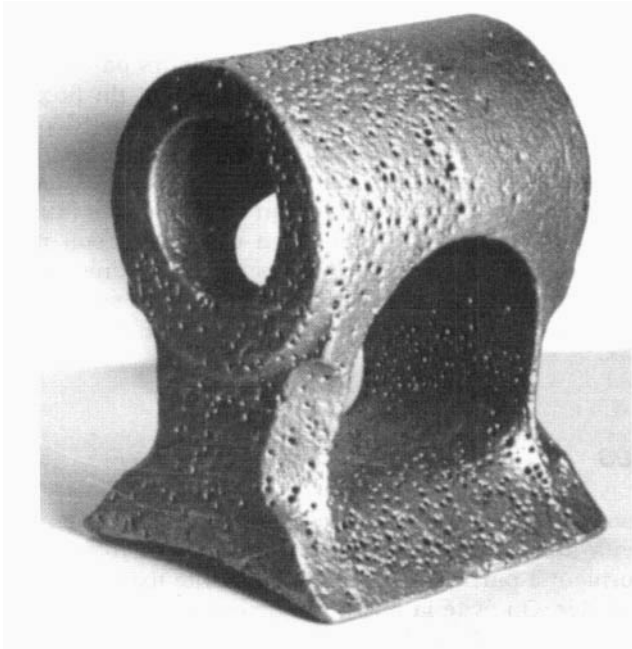


Fig. 2.6. Piqûres de surface sur une pièce moulée.

Lorsqu'ils sont de petites dimensions, ces défauts sont pratiquement sans conséquence car ils disparaissent avec la calamine lors des réchauffages ultérieurs de l'acier.

Lors de la coulée des lingots, on peut risquer la formation de gouttes froides ou des doubles peaux. Ces défauts, qui sont des bandes de métal séparées du reste du lingot par une couche d'oxyde, se forment lorsque les éclaboussures se solidifient sur les parois de la lingotière ou que du métal liquide s'infiltre entre la lingotière et une première peau solidifiée. Ils sont faciles à détecter car ils se refroidissent plus rapidement que le reste de la surface et apparaissent en sombre à la sortie d'un four.

Aspects spécifiques des soudures

Lors de la réalisation d'une soudure, il y a généralement fusion locale du métal de base, toujours fusion du métal d'apport. Au cours de la solidification, toutes les causes de défauts intrinsèques déjà exposées sont potentiellement actives (ségrégation, retassure et contraintes dues aux gradients thermiques). Cependant, en raison des caractéristiques de cette opération, leurs effets sont différents du cas des grosses pièces. De plus, certains phénomènes, propres à la soudure, peuvent s'ajouter et être à l'origine de défauts spécifiques.

Les inclusions

Ainsi, lors de la réalisation d'une soudure en plusieurs passes, des inclusions peuvent être la conséquence d'un mauvais enlèvement du flux (le laitier protecteur solidifié) ; une partie du flux de la passe précédente peut rester accrochée sur les bords du caniveau du cordon de soudure et être recouverte par la passe suivante, formant une inclusion assez anguleuse. Les risques d'obtention de ces défauts augmentent lorsqu'on utilise des flux qui favorisent un cordon fortement bombé. De même, bien que le cas soit rare, l'électrode d'une soudure TIG peut fournir des gouttes de tungstène qui s'incorporent dans le cordon de soudure. Ces inclusions métalliques sont obtenues si, par inadvertance, l'opérateur met en contact l'extrémité de l'électrode avec le bain liquide.

Les soufflures

Les soufflures sont fréquentes dans les cordons. Les gaz qui en sont à l'origine sont soit présents dans le métal de base (soudure des tôles d'aciers effervescents), soit se forment à partir de l'humidité ambiante fixée sur les électrodes ou les surfaces à souder. On évite la libération de ces gaz, généralement l'oxyde de carbone, par adjonction dans les électrodes de désoxydants et aussi en desséchant les électrodes à l'étuve avant utilisation.

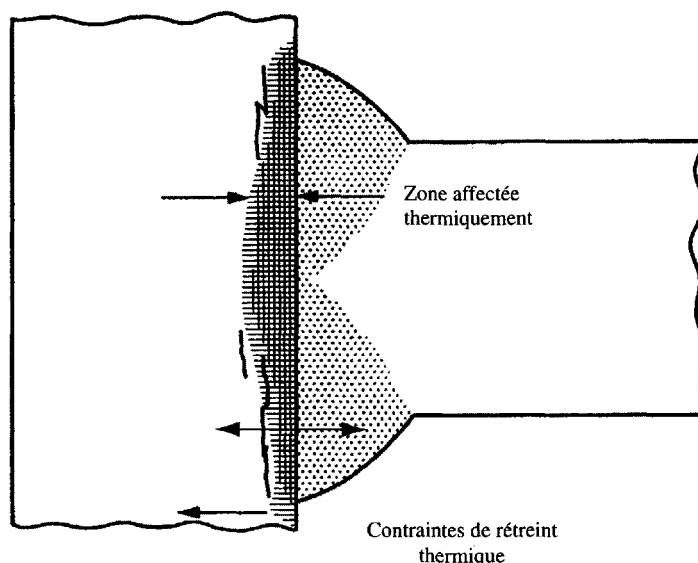


Fig. 2.7. Développement schématique d'un arrachement lamellaire.

Les criques

Les criques, toujours à redouter dans les cordons de soudure en raison des très forts gradients thermiques créés par la fusion locale du métal, sont parfois appelées fissures à chaud. Elles peuvent atteindre des tailles considérables et se propager le long du cordon au fur et à mesure de sa formation. De plus, d'autres fissures peuvent se développer au voisinage du métal fondu. Ce sont les arrachements lamellaires et les fissures à froid (Fig. 2.7).

Les arrachements lamellaires

Lors de la réalisation d'un assemblage où deux tôles fortes sont perpendiculaires (coin, joint en T...), les contraintes thermiques de refroidissement ont une composante de traction parallèle au travers de l'une des deux tôles. Une faible ductilité transverse favorise la formation de fissures dites arrachement ou déchirement lamellaire. La surface de ces fissures, en marches, correspond aux alignements locaux des inclusions, obtenus par laminage, et le long desquels la rupture s'est propagée de proche en proche (Fig. 2.8).

La fissuration à froid

La fissuration à froid est un phénomène que l'on peut attendre lors de la soudure d'aciers de construction trempants. Elle apparaît dans la fraction de la zone

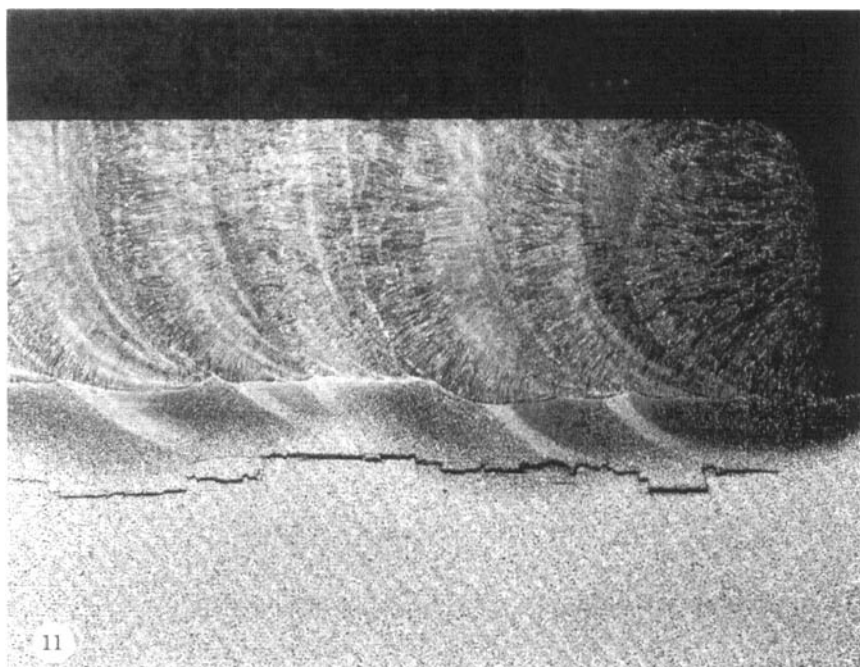


Fig. 2.8. Fissuration par arrachement lamellaire sur une soudure.

affectée thermiquement (ZAT) qui est passée au-dessus de A_3 (passage dans le domaine austénitique). Ces fissures se développent à la température ambiante, longtemps, parfois plusieurs jours, après la réalisation de la soudure. Le mécanisme de leur formation fait intervenir simultanément la présence d'hydrogène, une structure de trempe dans la ZAT et des contraintes internes à la suite du soudage.

Lors de la réalisation du cordon, l'hydrogène, dégagé par la décomposition de certains enrobages ou de l'eau provenant de traces d'humidité résiduelle, passe en solution dans la zone fondue et, par diffusion, dans l'austénite qui s'est formée au contact du bain de fusion. La solubilité de l'hydrogène dans l'austénite étant près de deux fois plus grande que dans la ferrite, la transformation martensitique de la zone austénitisée induit une sursaturation locale en hydrogène car celui-ci n'a pas le temps de diffuser lors de cette transformation rapide. À froid, les contraintes résiduelles et la fragilité intrinsèque de la martensite favorisent la propagation de fissures qui se sont initiées par rassemblement d'atomes d'hydrogène autour de singularités (précipités, micro-inclusions et, parfois, singularités de forme) ainsi qu'illustré en figure 2.9.

Ce type de fissuration n'est présent que dans la ZAT et donc donne généralement des défauts de petites tailles. On le prévient en réduisant les teneurs en hydrogène de tous les matériaux utilisés (choix et séchage des électrodes...) et en allongeant le cycle thermique de la soudure : un préchauffage diminue la vitesse

Bibliographie et Références

Afin d'alléger cet ouvrage, les très nombreux travaux sur lesquels s'appuient les concepts présentés n'ont pas été référencés de façon exhaustive. On s'est limité à ceux d'où sont tirées les illustrations, agrémentés de quelques articles plus particuliers. Le lecteur désireux de se constituer un jeu de références classiques utilisera à profit celles qui sont proposées dans les ouvrages de la bibliographie, sources d'approfondissements éventuels.

- B1. Meguid S.A., *Engineering Fracture Mechanics*, Elsevier Appl. Sci., London & New York, 1989, 397 p., 195 fig. *Approche généraliste, analyse des singularités de contraintes assez développée.*
- B2. François D. et Joly L. Ed., *La Rupture des Métaux*, Masson, Paris, 1972, 309 p., 85 fig. (épuisé). *Recueil des interventions à l'école d'été de la Colle sur Loup 1970.*
- B3. Tetelman A.S. & Mc Evily A.J., *Fracture of structural materials*, John Wiley & Sons, 1967, 697 p., 375 fig. *Approche à culture métallurgique, avec forte attention aux aciers et alliages industriels.*
- B4. Leibowitz H. Ed., *Fracture – an advanced treatise*, Academic press, New York, 1968. 8 volumes, *Approche détaillée et riche atlas de fractographie.*
- B5. Desjardin D. et Oltra R. Ed., *Corrosion sous contrainte – Phénoménologie et mécanismes*, Les Éditions de Physique, Les Ulis, France, 1992, 870 p., environ 180 fig. *Recueil des interventions à l'école d'été de Bombanne 1990.*
- B6. Bathias C. et Baillon J.-C. Ed., *La fatigue des matériaux et des structures*, Hermes, Paris, 1997, 684 p., 352 fig. *Une revue extensive de tout ce qui touche à la fatigue, particulièrement développée pour l'analyse des résultats d'essais.*
- B7. Miannay D., *Mécanique de la Rupture*, Les Éditions de Physique, Les Ulis, France, 1995, 287 p., 95 fig. *Une approche par la mécanique, nombreux exercices.*
- B8. François D., Pineau A. et Zaoui A., *Comportement mécanique des matériaux : viscoplasticité, endommagement, mécanique de la rupture, mécanique du contact*, Hermes, Paris, 1993, 494 p., 55 fig. *Un équilibre savant entre mécanique et métallurgie.*
- B9. Bui H.D., *Mécanique de la rupture fragile*, Masson, Paris, 1978, 215 p., 70 fig. *Comment évaluer les singularités de contraintes.*
- B10. Barthélémy B., *Notion pratique de mécanique de la rupture*. Eyrolles, Paris, 1980, 291 p., 168 fig. *Une revue générale avec nombreuses applications numériques.*

- B11. Recho N., *Rupture par fissuration des structures*, Hermes, Paris, 1993, 363 p., 170 fig. *Applications aux constructions soudées*.
- B12. *Failure analysis and prevention – Metal handbook*, vol. 11, ASM Metal Park, Ohio, 1986, 843 p., 256 fig. *Très nombreuses illustrations, chaque chapitre écrit par un spécialiste du domaine*.
- B13. *Fractography – Metal Handbook*, vol. 12, ASM Metal Park, Ohio, 1987, 517 p., 725 fig. *Nombreux conseils techniques et atlas de fractographie détaillés*.
- B14. *Corrosion Handbook – Metal Handbook*, vol. 13, ASM Metal Park, Ohio, 1987, 1425 p., 854 fig. *Plusieurs chapitres sur la corrosion sous contrainte. Très nombreuses fractographies*.
- B15. Peterson R.E., *Stress concentration factors*, John Wiley & Sons, London, 1974. *Le titre parle de lui-même*.
- B16. Muralami Y. Ed., *Stress Intensity Factors Handbook*, Pergamon Press, Oxford, UK, 1987. *Le titre parle encore de lui-même*.
- B17. Boch P. Ed., *Propriétés et application des céramiques*, Hermes Sci., Paris, 2001, 319 p., 113 fig. *Spécificité des céramiques*.
- B18. Stephens R.I. Ed., *Case Studies for Fatigue Education*, ASTM STP 1250, 1994, 219 p., 147 fig. *Une série d'études de cas ayant un caractère pédagogique marqué*.
- B19. *Règles et Codes de Construction des Réacteurs – Mécanique*, AFCEN, Paris, 1985.
- B20. Web-based NDE Educational Materials for Community College. *Cours en ligne de l'Iowa State University, très pédagogique avec nombreux exemples et applets Java*: <http://www.cnde.iastate.edu/cnde/education.html>
- B21. Thomas E.L. Ed., *Structure and properties of polymers*, VCH, Weinheim, Suisse, 1993. *Ensemble de monographies recouvrant tous les aspects des polymères*.