

Matériaux

Exercices

Matériaux Métalliques

Frédéric Menan

<https://lesdocsduprof.com/>

fmenan@cesi.fr

2023

Table des matières

MATERIAUX METALLIQUES	3
EXERCICE : LE SOUDAGE DES METAUX	3
EXERCICE : CYCLE DE VIE D'UN EMBALLAGE METALLIQUE.....	5
EXERCICE : CEMENTATION D'UNE PIECE MASSIVE EN ACIER DOUX	7
ETUDE DE TEXTE : ELABORATION DES BANDES D'ACIER ET D'ALUMINIUM-OK	10
ETUDE DE TEXTE : REVETEMENT, PROTECTION, CONTACT ALIMENTAIRE, RECYCLAGE DES EMBALLAGES METALLIQUES	19
EXERCICE : EXIGENCES FONCTIONNELLES DES EMBALLAGES METALLIQUES-OK.....	33
RELATIONS MICROSTRUCTURE – PROPRIETES MECANIQUES	35
EXERCICE : LAMINAGE D'UNE TOLE.....	35
EXERCICE : DURCISSEMENT PAR ECROUISSAGE DE L'ALLIAGE 1200	35
EXERCICE : LE SYSTEME FER-CARBONE : RELATIONS STRUCTURE/PROPRIETES MECANIQUES	37
TRAITEMENTS THERMIQUES	41
ÉTUDE DE CAS : EXPLOSION D'UNE CHAUDIERE	41
PROCEDES	47
EXERCICE : MODES DE DEFORMATION : PIECES TYPIQUES	47
EXERCICE : MODES DE DEFORMATION : INFLUENCE DU SERRE FLAN	47
REFERENCES	49

Matériaux métalliques

Exercice : le soudage des métaux

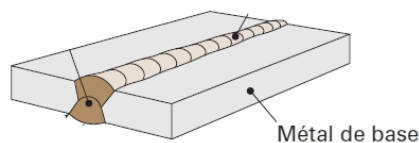
Cet exercice porte sur une analyse critique des documents suivants :

- m715 Soudage et soudabilité métallurgique des métaux, G. Murry, Techniques de l'Ingénieur
- BM5186 v2 Pièces mécaniques soudées Comportement, A. Michel, Techniques de l'Ingénieur
- b7720 Soudage par résistance, R. Cazes, Techniques de l'Ingénieur
- c2522 Constructions métalliques Assemblages par soudage, JP. Muzeau, Techniques de l'Ingénieur
- bm5185 v2 Pièces mécaniques soudées Rappels et définitions, A. Michel, Techniques de l'Ingénieur

PARTIE 1 : refroidissement, dilatation, actions postérieures au soudage

Introduction

L'opération de soudage par fusion consiste à faire fondre un métal d'apport en même temps que les plats ou les profilés à assembler. Le métal fondu provenant de chaque élément est réuni au niveau du joint dans un bain de métal qui comble l'interface. Au fur et à mesure que le bain de fusion se refroidit, le métal fondu qui se trouve à la limite de fusion se solidifie, formant un lien solide avec le métal de base. Quand la solidification est totale, il y a continuité du métal à travers le joint.



Dilatation

La solidification et le refroidissement concomitant du métal fondu engendrent une contraction en volume dont un ordre de grandeur de l'ampleur est donné par la figure ci-dessous, en ce qui concerne le fer et l'aluminium.

Toute modification de la température d'un métal s'accompagne de variations de son volume :

- systématiques et continues par le jeu de la dilatation ;
- éventuelles et discontinues par le jeu des transformations allotropiques.

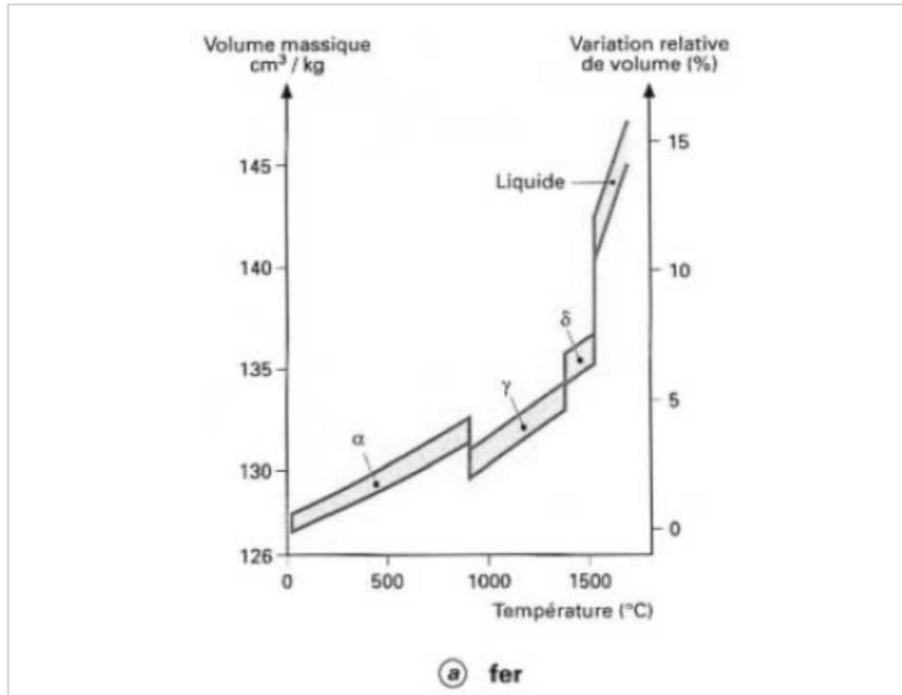


Figure 1. Evolution du volume massique du fer en fonction de la température

Risque de trempe dans le cas du soudage de l'acier

La trempe d'un acier se développe lors de son refroidissement brusque à partir d'une température supérieure à 900°C . Elle a pour conséquence de « figer » la structure cristalline du métal qui possède alors une dureté plus grande mais une plus grande fragilité. Dans le cas d'une opération de soudage, la température du cordon en fusion peut atteindre 1300°C alors que le métal de base reste à température ambiante. L'acier ayant un fort coefficient de conduction thermique, il possède une grande capacité à absorber la chaleur et à permettre un refroidissement très rapide du métal de base. Les conditions de trempe sont réunies. Le cordon et la zone affectée par la chaleur (ZAC) sont susceptibles de subir la trempe.

Actions postérieures au soudage

Après réalisation d'un joint, il peut être utile d'intervenir pour pallier les déficiences résultant de l'intervention de certains phénomènes métallurgiques. On pourra envisager, si nécessaire :

- de modifier l'état structural du métal dans le joint et notamment d'affiner les grains dans le métal fondu et dans la partie surchauffée de la ZAC ;
- de faire évoluer un état structural hors équilibre, il s'agit alors d'un traitement de revenu ;
- de diminuer le niveau des contraintes résiduelles, il s'agit d'une relaxation ;
- d'améliorer la géométrie du raccordement entre le métal de base et le métal fondu ;
- de créer des contraintes résiduelles favorables à la tenue mécanique du joint. Les contraintes résiduelles s'ajoutent aux sollicitations de service et peuvent, de ce fait, altérer le comportement mécanique d'une construction et notamment diminuer sa résistance à la fatigue et à la corrosion sous contrainte ;

Questions partie 1

1. Sur la figure 1, à quoi correspondent les symboles α , δ et γ ?
2. « La trempe d'un acier se développe lors de son refroidissement brusque à partir d'une température supérieure à 900°C. ». Expliquer cette température de 900°C.
3. Dans les actions postérieures au soudage, pourquoi souhaite-t-on affiner les grains dans le métal fondu et dans la partie surchauffée de la ZAC ? Rappeler le nom de la loi décrivant l'influence de la taille de grains sur la limite d'élasticité d'un matériau polycristallin.

PARTIE 2 : comportement mécanique

Cas d'un cordon de soudure fissuré lors de l'opération de soudage

Lors d'une mauvaise opération de soudage, des défauts de compacité, de types fissures longitudinales, peuvent apparaître dans diverses zones de l'assemblage (Figure 2). Ces défauts peuvent fortement réduire la résistance mécanique de l'assemblage.

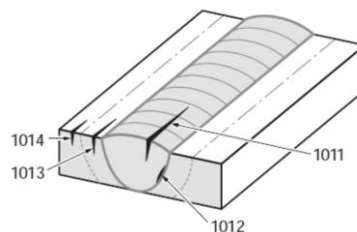


Figure 2. Défauts de type fissures longitudinales

Questions partie 2

On considère le défaut 1013 de la Figure 2. On rappelle que le facteur d'intensité de contraintes en pointe de fissure est donné par la formule

$$K = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{(\pi \cdot a)}.$$

On prendra $Y = 1$. La ténacité du matériau est de $30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Déterminer la longueur maximale de fissure admissible a pour garantir une résistance en traction $R_m = 350 \text{ MPa}$.

Exercice : cycle de vie d'un emballage métallique

On présente ci-dessous l'analyse de cycle de vie d'un emballage métallique. Relier chaque mot-clé du tableau à une ou plusieurs étapes du cycle de vie et justifier votre réponse.

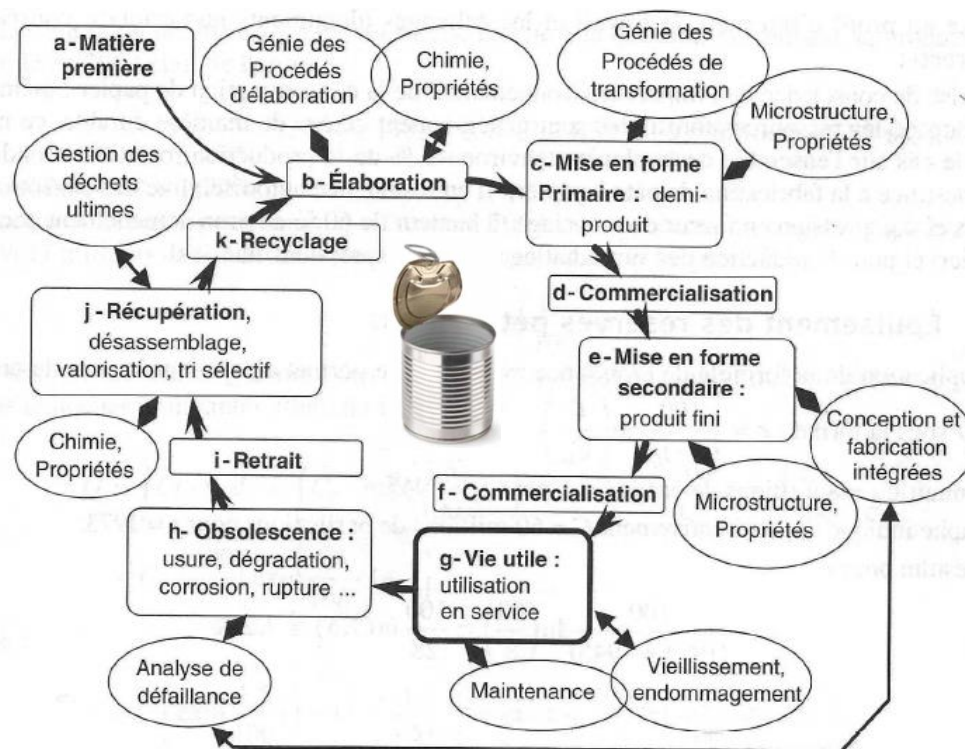


Figure 3. Schéma général de (Dupeux and Gerbaud, 2010)

Mot-clé	Etape (a à k)	Justification
Laminage		
Vernissage		
Dissolution anodique		
Emboutissage		
Propriétés magnétiques		
Recuit		
Sertissage		
Soudage par résistance		
Vieillessement des aciers		
Rechampissage		
Test d'étanchéité		

Exercice : cémentation d'une pièce massive en acier doux

On souhaite produire une pièce massive cylindrique, diamètre 60mm, en acier 10CrMo8 recuit (acier à 0.1% de carbone).

Cette pièce doit présenter une dureté HV=700 (soit environ HRC = 60), tout en conservant une bonne résilience.

Ce type de combinaison de propriétés à première vue contradictoires fait couramment partie du cahier des charges de pièces mécaniques devant à la fois résister à l'usure et supporter des chocs ou des à-coups en fonctionnement : axes ou arbres courts supportés par des paliers lisses, fleurets de forage, tiges d'outils à percussion...etc. La contradiction entre dureté élevée et bonne résilience peut être résolue en séparant matériellement les deux fonctions sur la pièce : pour résister à l'usure, une dureté élevée n'est nécessaire qu'en surface de la pièce, tandis que le cœur de cette même pièce peut être de dureté plus faible pour conserver une bonne résilience.

Partie 1 : constitution du matériau à l'état normalisé

Question 1/ Déterminer la constitution du matériau à 500°C, pour un refroidissement lent.

Question 2/ Estimer la dureté obtenue lors d'un refroidissement lent

Question 3/ Sur cet acier 10CrMo8, peut-on obtenir, par trempe, la dureté souhaitée en surface ? Justifier votre réponse

Partie 2 : cémentation

La cémentation est un procédé consistant à enrichir un acier en carbone, par diffusion, pour le durcir en surface, tout en conservant ses propriétés mécaniques initiales en profondeur.

On fait subir à la pièce un traitement de cémentation qui élève en surface la teneur en carbone jusqu'à 1%, sur une épaisseur d'environ 1mm. Le matériau obtenu, en surface, peut être appelé 100CrMo8. La pièce cémentée est ensuite chauffée 30min à 850°C et trempée à l'eau.

Question 4/ Pourquoi chauffe-t-on initialement à 850°C avant la trempe ?

Question 5/ Quelle sera la dureté à la surface de la pièce après cette trempe ? Détailler votre raisonnement

Question 6/ Indiquer un traitement complémentaire à effectuer pour aboutir plus exactement à la dureté superficielle attendue. Préciser les conditions de ce traitement.

Question 7/ Pour éviter d'avoir à effectuer le traitement de cémentation, on pourrait envisager de fabriquer directement la pièce entière en acier dur de type 100CrMo8. A votre avis, pourquoi cette solution n'a pas d'intérêt ?

Données

On suppose que pour chaque acier, la dureté de l'alliage est une moyenne des duretés de chaque phase, pondérée par leur fraction massique.

Hv (ferrite) = 80 ; Hv(austénite) = 200 ; Hv(cémentite) = 810

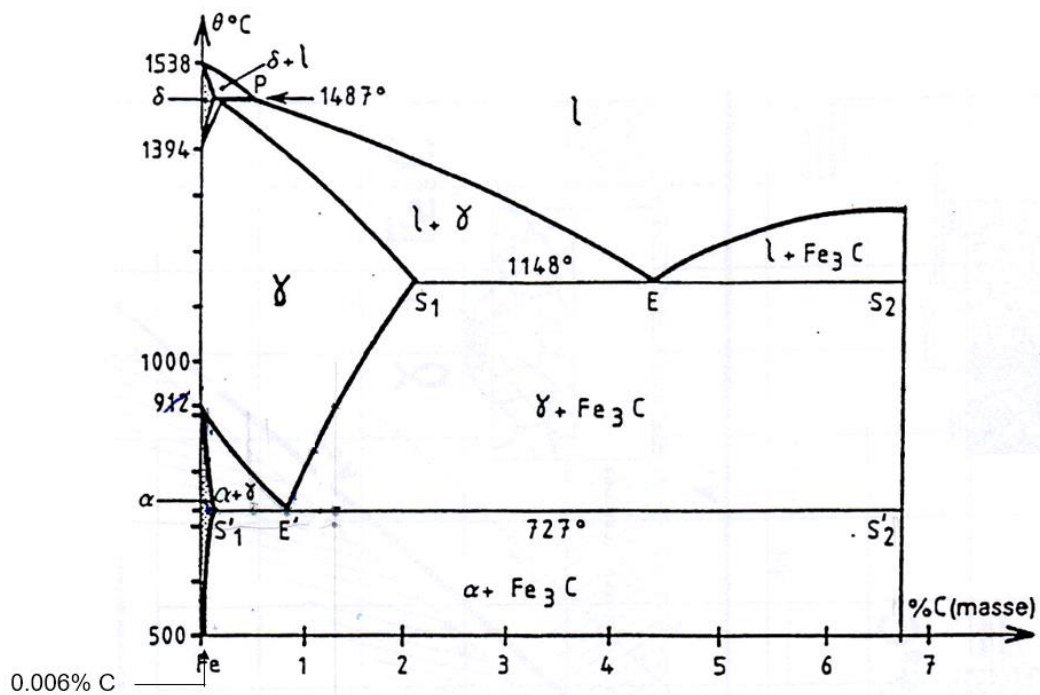


Diagramme d'équilibre métastable ou à cémentite

Abscisses des points principaux :

S_1 : 2,11 %	E : 4,30 %	S_2 : 6,67 %
S'_1 : 0,022 %	E' : 0,77 %	S'_2 : 6,67 %

Figure 4. Diagramme d'équilibre du système Fe-C

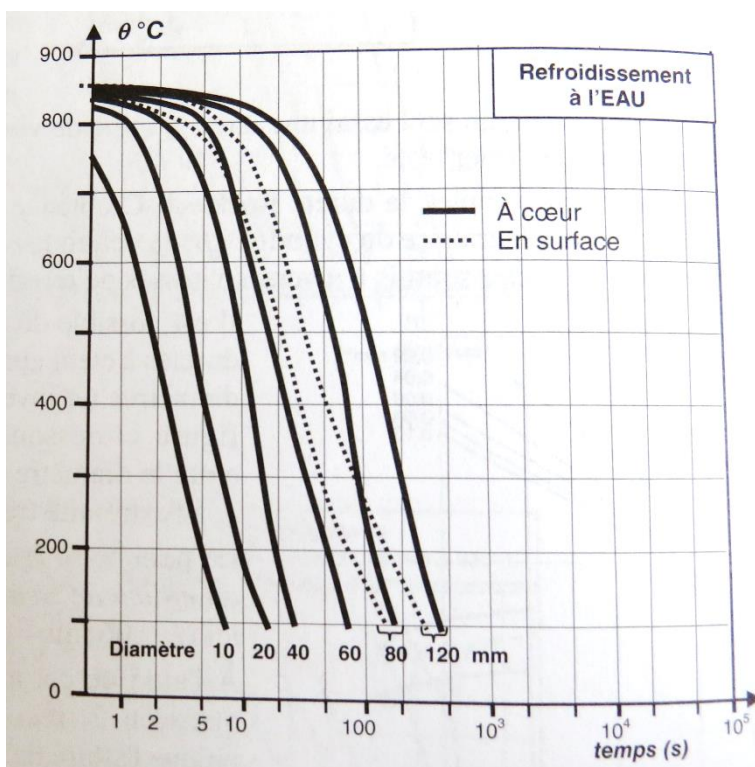


Figure 5. Courbes de refroidissement à l'eau de barres d'acier cylindriques de différents diamètres depuis 850°C

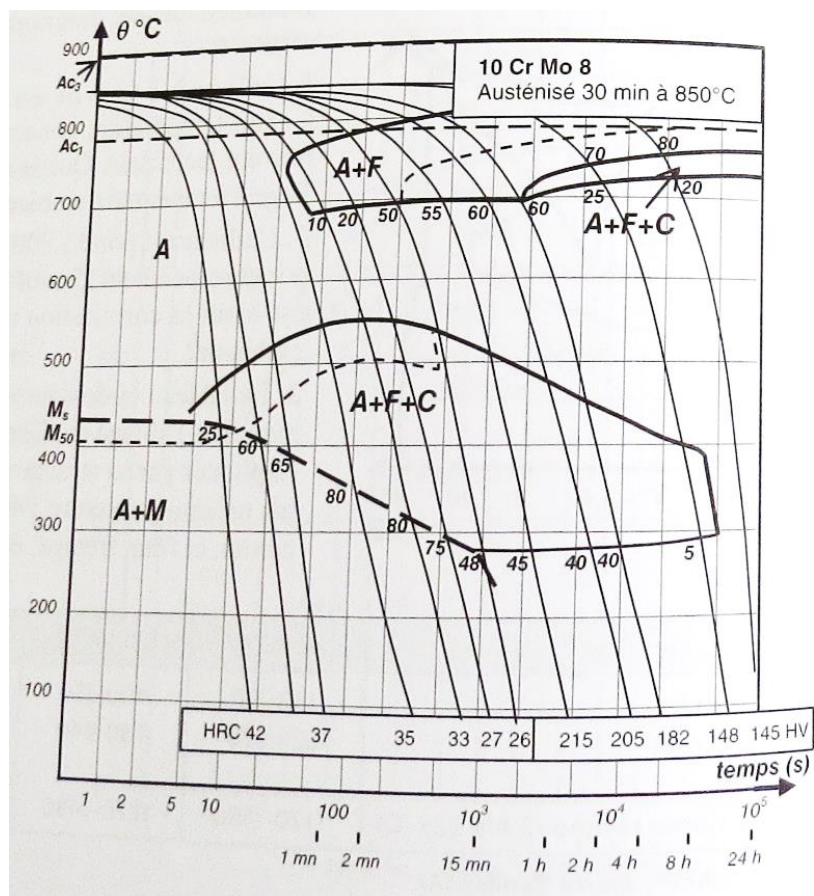


Figure 6. Diagramme TRC de l'acier 10CrMo8 (0.1%C) avec échelle de duretés en fonction de la vitesse de refroidissement

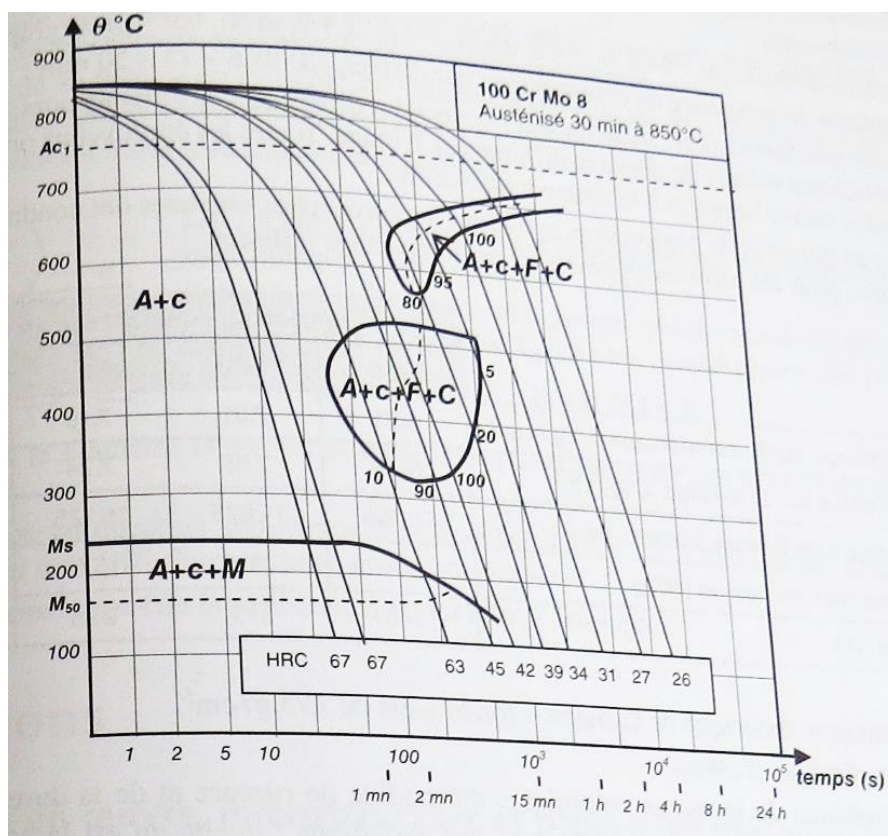


Figure 7. Diagramme TRC de l'acier 100CrMo8 (1%C) avec échelle de duretés en fonction de la vitesse de refroidissement

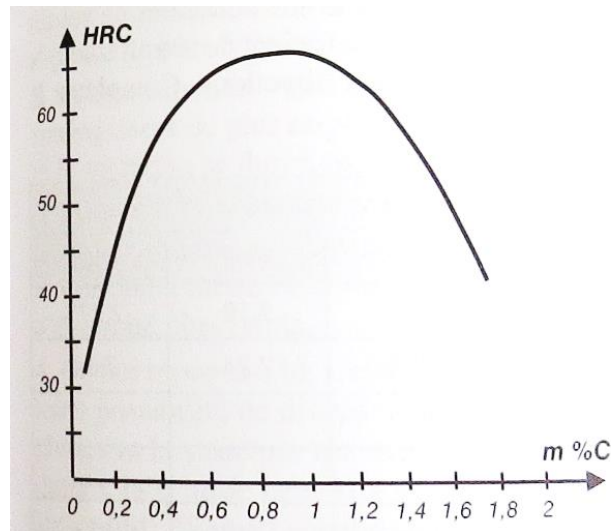


Figure 8. Dureté HRC obtenue après trempe martensitique d'aciers en fonction de leur pourcentage massique en carbone

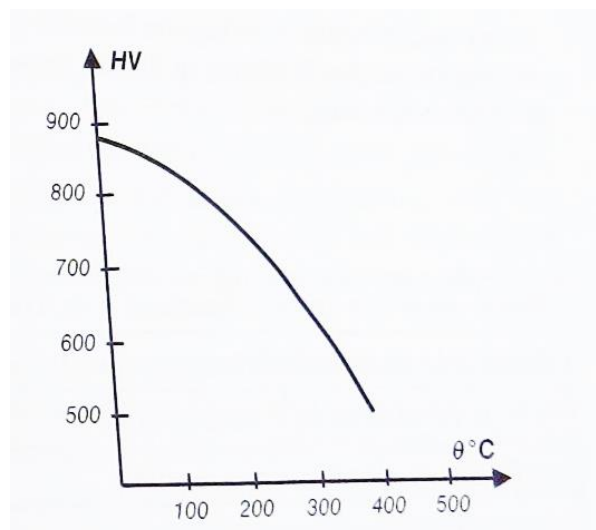


Figure 9. Dureté en fonction de la température de revenu après trempe martensitique (revenus de 1h)

Etude de texte : Elaboration des bandes d'acier et d'aluminium-ok

Liste des documents

1. TI A9760 emballages métalliques
2. TI m7960 aciers emballage
3. TI m7950 laminage à froid sur produits plats
4. TI M235 Vieillissement des aciers
5. NF EN 10027-1 Systèmes de désignation des aciers

6. ARCELOR MITTAL Catalogue Aciers pour l'emballage 2013
7. TI m7955 Recuit
8. TI m3060 Métallurgie des tôles laminées sur trains continus
9. TI m7940 laminage à chaud

Questions

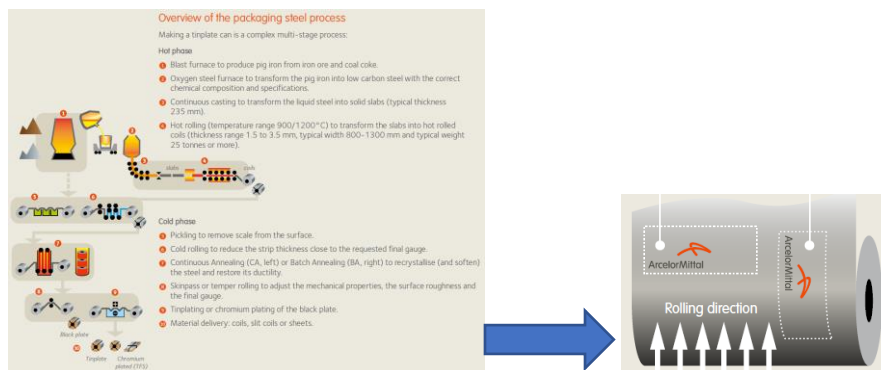
A l'aide des documents fournis, répondre aux questions suivantes :

Aciers pour l'emballage

1. Quels sont les 4 principaux aciers pour l'emballage ?
2. Citer une application des aciers inoxydables pour l'emballage
3. Citer une application du fer noir pour l'emballage
4. Dans la norme NF EN 10027-1, que nous indiquent les désignations TH415 et TS290 ? Est-ce en accord avec le document ARCELOR ?

Elaboration des bandes d'acier et d'aluminium

5. Détailler le rôle des étapes suivantes du processus d'élaboration des bandes :
 - Etape 4. Laminage à chaud
 - Etape 5. Décapage
 - Etape 6. Laminage à froid
 - Etape 7. Recuit
 - Etape 8. Skin pass (écrouisseur)
 - Etape 9. Etamage ou chromage
6. Quels sont les avantages du laminage à froid par rapport au laminage à chaud ?
7. Quel est le principe du recuit continu ?
8. Quel est le principe du recuit base ?
9. Quels sont les avantages du recuit continu par rapport au recuit base ?
10. Qu'est-ce qu'une bande de Piobert Lüders ? Que provoque-t-elle sur une courbe de traction ? Quelle opération permet d'éviter ces bandes peu esthétiques, qui peuvent apparaître lors de l'emboutissage des emballages ?



Correction

Matériaux Métalliques. TD Elaboration des bandes. Correction

Quels sont les 4 principaux aciers pour l'emballage ? TI A9760. Réponse : Fer noir, Fer blanc, Fer chromé, Inox

Citer une application des aciers inox pour l'emballage ? TI A9760. L'acier inoxydable est utilisé pour certains emballages destinés à l'industrie chimique et pour lesquels on exige des qualités particulières de résistance chimique.

Citer une application du fer noir pour l'emballage ? TI A9760. Rappel : on entend par fer noir une tôle en acier doux, de même composition, de même épaisseur et de mêmes caractéristiques que le fer-blanc (§ 1.1.2), laminée à froid et n'ayant subi ni étamage, ni huilage, ni aucun autre traitement de surface. Exemples d'applications : bidons, seaux.... Dans la norme NF EN 10027-1, que nous indiquent les désignations TH415 et TS290 ? Est-ce en accord avec le document ARCELOR ?

Norme NF EN 10027-1 / Doc ARCELOR

- T : acier pour emballage
- H : recuit continu
- S : recuit base
- Suivi de la valeur nominale de Re en MPa dans les deux cas, donc
- TH415 : acier pour emballage, recuit continu, Re mini = 415 MPa
- TS290 : acier pour emballage, recuit base, Re mini = 290 MPa

En accord avec doc ARCELOR (voir ci-dessous)

(CA : continuous annealing = recuit continu ; BA : batch annealing = recuit base)

AMFCE	EN10202	Old EN	ASTM	Annealing	Reduction	Yield stress (MPa)	Thickness range	Main end use
TS230	TS230	T50	T1	BA	SR	230	0.16 - 0.49	Bakeware
TS245	TS245	T52	T2	BA	SR	245	0.16 - 0.49	General line
TS260	TS260	T55		BA	SR	260	0.16 - 0.49	Expanded cans
TS275	TS275	T57	T3	BA	SR	275	0.16 - 0.49	General purpose
TS290	TS290	T59	T4	BA	SR	290	0.16 - 0.49	Aerosol tops
TS340				BA	SR	340	0.14 - 0.49	Can bodies, can ends
TS480				BA	DR	480	0.14 - 0.34	3P can bodies
TS500				BA	DR	500	0.14 - 0.30	3P can bodies
TS520		DR520	DR7.5	BA	DR	520	0.12 - 0.30	3P can bodies
TS550		DR550	DR8	BA	DR	550	0.12 - 0.30	3P can bodies
TH330				CA	SR	330	0.16 - 0.49	Drawn can bodies
TH360				CA	SR	360	0.16 - 0.49	Drawn can bodies
TH415	TH415	T61	T4	CA	SR	415	0.16 - 0.49	3P can bodies, crown corks

Tableau 10 — Fer noir, fer blanc, fer chromé
(produits en aciers pour emballage)

Symboles principaux					Symboles additionnels pour l'acier		Symboles additionnels pour les produits en acier	
T H n n n					+an +an a)			
T S n n n								
Symboles principaux					Symboles additionnels			
Lettre	Caractéristique mécanique	Pour l'acier			Pour les produits en acier			
		Groupe 1	Groupe 2					
T = Fer noir, fer blanc, fer chromé (acier pour emballage)	Hnnn = Valeur nominale de la limite d'élasticité (R_e), en MPa ^{b)} , pour les produits recuit continu Snnn = Valeur nominale de la limite d'élasticité (R_e), en MPa ^{b)} , pour les produits recuit base	—		—		Tableaux 17 et 18		
						NOTE : Aucun symbole n'est affecté au fer noir		

Détailler le rôle des étapes

Etape 4. Laminage à chaud

Réduction d'épaisseur (TI m7940)

Etape 5. Décapage

TI m7950 p5 « Les bandes laminées à chaud sont recouvertes d'une couche d'oxydes appelée calamine, l'opération de décapage a pour objectif essentiel l'enlèvement de cette couche ; les bobines décapées sont le plus souvent destinées au laminage à froid, ou utilisées en l'état. »

Etape 6. Laminage à froid

Sources : TI m7950, Doc ARCELOR, § Laminage du cours

The only role of that step is to reduce the thickness close to the final value. The typical reduction rates are between 85% and 95% (to pass from 2 mm to 0.2 mm for example). The cold rolling rate is adapted to ensure low planar anisotropy.

Etape 7. Recuit

Sources : TI m7955, Doc ARCELOR

Objectif : restaurer les propriétés de ductilité du métal laminé à froid.

After cold rolling, a high temperature treatment (around 600°C – 800 °C) is necessary to recrystallise the strip and restore its ductility and make possible the forming of the strip into can parts. The usual grain size range is around 5-10 μm (= ASTM grain size 10-12). There are two types of annealing: Batch Annealing - BA (coil is put for several hours in the furnace) or Continuous Annealing - CA (strip is passed through a heating section for a few minutes at higher temperature). CA is the most popular nowadays for its highly homogeneous properties and high yield strength. BA is still preferred for low tempers and its very low ageing properties.

Etape 8. Skin pass (écrouisseur)

Sources : TI M7960 §2.3.5 Écrouissage, M7950, M235 §6.2 Suppression du palier par skin pass

- effacer le palier de la courbe de traction (voir question 13)
- imprimer à la tôle sa rugosité définitive
- éventuellement, corriger sa planéité.
- Obtenir l'épaisseur finale demandée (It allows to achieve the ordered thickness)

Etape 9. Etamage ou chromage

Sources : M7960, F1310, Doc ARCELOR

Ces étapes ont pour but de donner le revêtement, donc le matériau, souhaité (fer blanc ou fer chromé).

Etamage : la bande d'acier est revêtue d'étain par électrolyse. La bande d'acier sert de cathode, l'anode est constituée de barres d'étain pur. Après électrolyse, le dépôt d'étain subit une fusion vers 300°C. Il prend alors un aspect brillant qui est figé par trempe à l'eau et l'alliage FeSn₂ se forme. La surface du fer-blanc subit ensuite un traitement de passivation électrolytique ou chimique qui dépose une très fine couche d'oxyde de chrome et éventuellement de chrome puis, la surface est huilée.

Chromage (TI m7960 4. §Chromage électrolytique du fer noir). Le fer chromé diffère du fer-blanc en ce que la couche d'étain est remplacée par une mince couche de chrome métallique surmontée d'une couche d'oxyde de chrome, toutes deux formées par électrolyse.

Laminage à chaud. En quels matériaux sont faits les cylindres de laminoir ? Expliquer ce choix matériaux

Sources : M7940 §3.6.3 Défauts dus aux cylindres

Les cylindres sont en matériau NiCrMo pour résister aux hautes températures.

M7940 p12 : « Partant de cylindres monoblocs forgés ou coulés, alliés au Ni-Cr-Mo et trempés, on aboutit à des pièces composites produites en double coulée dont l'âme est adaptée aux sollicitations mécaniques (cœur en fonte à graphite sphéroïdal) et la surface aux agressions du laminage. »

Décapage. Justifier la Fig. 4 du doc M7950

Sources : M7950 ; M70P1 p.77 Figure 72

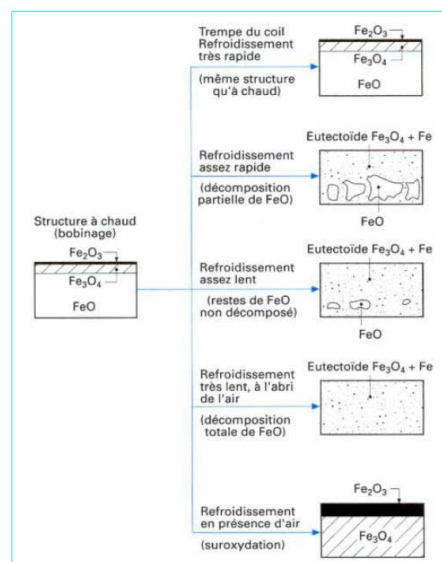
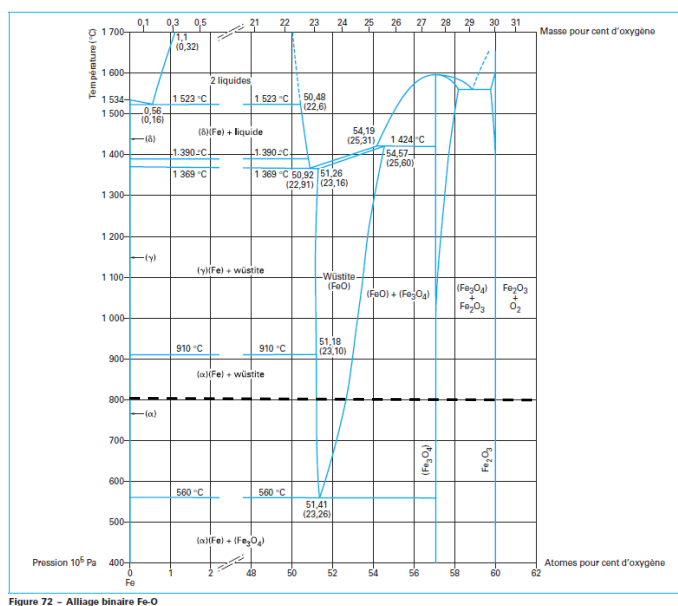


Figure 10. Structure de l'oxyde se formant en laminage à chaud

Structure de l'oxyde à chaud

La structure de l'oxyde qui se forme à chaud est décrite de la sorte dans le document TI-M7950 : « *En partant du métal vers l'atmosphère, la calamine sur la bande avant bobinage présente une zone d'interface puis une zone externe composée de la superposition des trois oxydes de fer (figure 4) : protoxyde FeO essentiellement (environ 2/3 de l'épaisseur), magnétite Fe_3O_4 (moins de 1/3), et un peu d'hématite Fe_2O_3 au contact de l'air.* »

Cette description est en accord avec le diagramme de phases Fe-O : à haute température (entre 560 et 1300°C), on trouve bien, pour un pourcentage en O croissant (donc du métal vers l'atmosphère), un domaine Fer α ou γ et Wustite FeO, un domaine monophasé FeO, puis apparition de Fe₃O₄ et Fe₂O₃ (ligne en gras pointillée à 800°C sur Figure 1)

Structure de l'oxyde à froid

Il convient ici de distinguer la zone de la bobine qui refroidit.

Dans un premier temps, il est acquis que si le refroidissement de la bobine est très rapide (cas particulier de la trempe à l'eau), la structure à froid est identique à la structure à chaud.

Si la bobine d'acier refroidit à l'air ambiant :

« les extrémités de la bande se refroidissent rapidement au contact de l'air » : la structure à froid dans cette zone sera identique à la structure à chaud.

« dans l'axe et au centre de la bande, les spires de la bobine étant très serrées, la calamine se refroidit lentement à l'abri de l'air ; elle se transforme d'abord intégralement en une couche de FeO par suite de la diffusion continue du fer dans la calamine privée d'apport d'oxygène, puis, le refroidissement étant lent, FeO se décompose plus ou moins complètement en eutectoïde aux températures inférieures à 570°C : $4 \text{ FeO} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe}$ »

Un refroidissement très lent, donc décrit par le diagramme de phases, donne bien du fer α et un composé défini Fe_3O_4 (voir domaine biphasé en dessous de 560°C).

Finalement, le cas de la suroxydation est à analyser sur le diagramme de phases en considérant une concentration importante en O, donc sur la droite du diagramme : on trouve bien un domaine biphasé Fe_3O_4 – Fe_2O_3 .

Laminage à froid. Comment est mesurée la température en sortie de dernière cage ? Expliquer le choix du moyen utilisé.

TI m7940 3.2.3.5 Mesure de température de bande

Le souhait des lamineurs est de mesurer la température de la bande avec une précision de ± 5 °C. Le capteur le plus utilisé est le pyromètre optique. On installe ces pyromètres principalement en sortie de dernière cage. Ils donnent des valeurs indicatives. On vise une température supérieure à 100°C pour faciliter l'essorage de l'émulsion et pour le fer-blanc on veille à ne pas dépasser la 150°C car la bande au contact de l'air risque de s'oxyder.

Remarque : le laminage se fait à froid mais la tôle s'échauffe sous l'effet de la déformation plastique

Avantages du laminage à froid par-rapport au laminage à chaud

TI m7950 Introduction

Les épaisseurs minimales réalisées par les trains à bandes continus à chaud sont de l'ordre de 1,2 mm. Pour obtenir des épaisseurs plus faibles, l'opération de laminage à froid est indispensable.

De plus, le laminage à froid présente d'autres avantages par rapport au laminage à chaud :

- excellent aspect de surface
- amélioration des tolérances dimensionnelles
- amélioration des propriétés métallurgiques (en particulier dans le domaine de l'emboutissage).

Quel est le principe du recuit base ?

TI m3060, doc ARCELOR

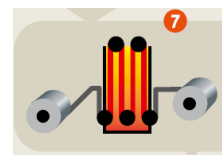
Dans sa version classique, le recuit sur base, le recuit consiste à porter les bobines serrées, disposées en piles, à une température de l'ordre de 700°C et, après une période d'homogénéisation nécessairement longue, à les laisser se refroidir lentement. Pour garder la surface du métal brillante et propre, toute l'opération se fait sous atmosphère contrôlée, réductrice. Anglais : Batch Annealing



Quel est le principe du recuit continu ?

TI m7955 recuit

Les bobines sont déroulées et la bande passe au travers d'un ou de plusieurs fours sous atmosphère contrôlée. Anglais : Continuous Annealing



Avantages du recuit continu par-rapport au recuit base ?

TI m7955 Introduction

Le recuit en bobine de la tôle mince est un procédé lent (le cycle thermique dure environ 3 jours, les temps de stockage entre les opérations séparées de parachèvement durent environ 4 jours). Le recuit continu présente un cycle thermique court, 1 à 3 min.

Autres avantages :

- Possibilité d'effectuer en continu en 10 min environ les opérations de recuit, d'écrouissage final dit « skin pass », de parachèvement et le contrôle d'aspect avant expédition.

- Le déroulage de la bande sur une ligne de recuit continu permet d'effectuer un nettoyage de la surface de la bande avant recuit et, en conséquence, d'abaisser le carbone en surface après recuit en dessous de 3 mg par m². Ce bas niveau de carbone en surface étant très favorable pour la qualité des traitements de surface ultérieurs.
- L'élimination des opérations séparées supprime des risques de détérioration par chocs ou rayures au cours des manutentions entre recuit et parachèvement.
- Le chauffage uniforme de toute la bande au cours du recuit continu est favorable pour l'homogénéité des caractéristiques mécaniques.
- La tension de la bande à température supérieure à 600°C améliore la planéité.

Bandes de Piobert Lüders ?

Sources : M235 §2.3.3

Lors du formage des aciers à palier, les petites déformations sont localisées dans des bandes dites de Piobert-Lüders. Ces bandes correspondant à une diminution locale d'épaisseur sont inclinées d'environ



Figure 4 - Lignes de Lüders : bandes multiples (vermiculaires)

45 à 50° par rapport à l'axe de sollicitation. Comme la frontière bande déformée-zone non déformée est très abrupte, il y a un effet de relief extrêmement visible en lumière rasante même après peinture (figure 4).

Wikipedia : Lüders bands, also known as "slip bands" or "stretcher-strain marks," are localized bands of plastic deformation in metals experiencing tensile stresses, common to low-carbon steels and certain Al-Mg alloys. First reported by Piobert and Lüders, the mechanism that stimulates their appearance is the pinning of dislocations by interstitial atoms (in steels, carbon and nitrogen).

Que provoquent-elles sur une courbe de traction ?

Source : M235 §2.3.3 Vermiculures et autres défauts d'aspects

La courbe de traction des aciers doux a la forme présentée à la figure 9. Après le crochet de limite d'élasticité, la déformation concentrée dans les bandes de Piobert-Lüders se propage d'un bout à l'autre de l'éprouvette. La déformation dans une bande est égale à la longueur du palier. On parle d'effet Portevin Le Chatelier.

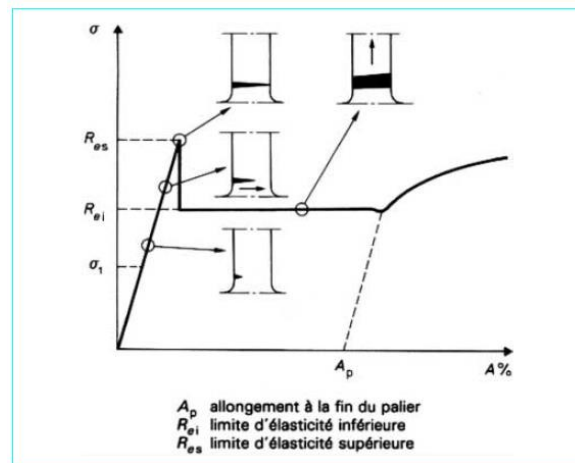


Figure 9 - Schéma de la propagation des bandes de Piobert-Lüders dans un acier doux

Wikipedia : L'effet apparaît quand les atomes de solutés (par exemple carbone dans l'acier) ont pu migrer jusqu'au cœur des dislocations. Ces atomes « épinglent » alors la dislocation et une force (et donc une contrainte) plus grande est nécessaire pour que la dislocation puisse se déplacer. Au bout d'un certain temps la dislocation se dégage de son nuage d'atomes et

la contrainte nécessaire au déplacement de la dislocation diminue. Lorsqu'une dislocation « libre » se déplace à l'intérieur du cristal elle perturbe les dislocations épinglées et provoque par effet d'avalanche la libération d'autres dislocations. L'effet pouvant se répéter plusieurs fois, les matériaux qui subissent l'effet Portevin-Le Chatelier possèdent une courbe contrainte-déformation non monotone avec un aspect ondulé caractéristique.

Quelle opération permet d'éviter ces bandes ?

Sources : M235 §2.3.3 Vermiculures et autres défauts d'aspects, Doc Arcelor

La solution est d'effacer le palier par une petite déformation par laminage dit skin pass (temper rolling).

M235 p17 : Quand on effectue une déformation par laminage, ce qui est le cas du skin pass, on génère non pas une bande unique ou deux bandes mais un réseau périodique tel qu'il est représenté sur la figure 31.

Pour une déformation donnée par skin pass, la tôle contient des alternances de zones déformées et non déformées. La présence de ce réseau de bandes de Piobert-Lüders entraîne plusieurs conséquences : chaque bande provoque une certaine concentration de contrainte, ce qui abaisse le seuil d'écoulement local et, lors d'un essai de traction ultérieur, il y aura abaissement apparent de la limite d'élasticité et suppression d'un bout de palier. Si l'écartement des bandes ainsi que leur profondeur atteignent une valeur critique, on a suppression du palier parce que la propagation des bandes se fait à une contrainte inférieure à R_e .

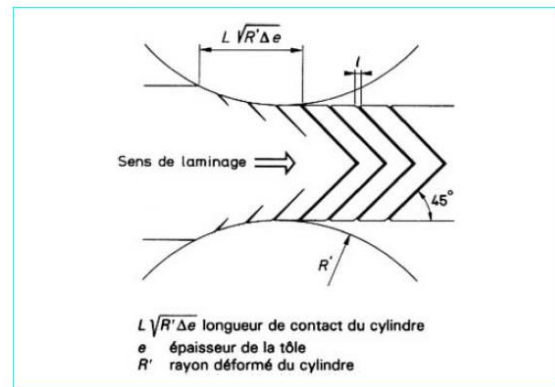
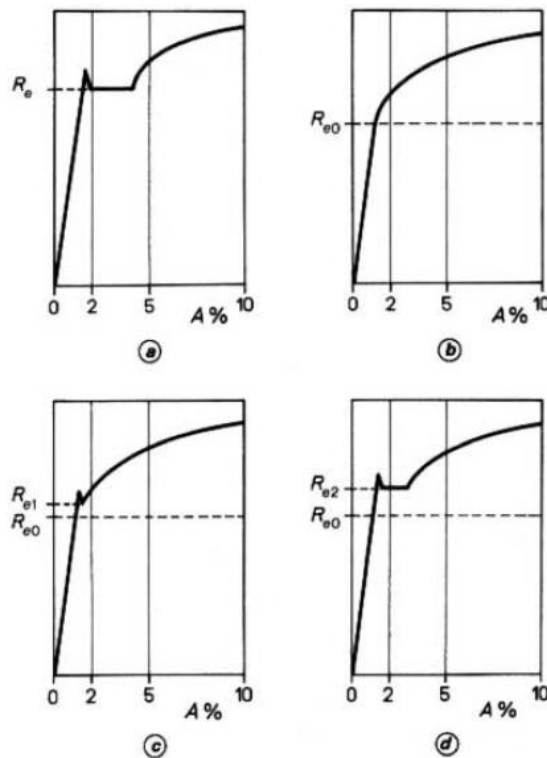
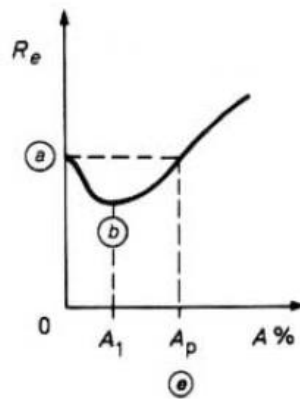


Figure 31 – Progression des bandes lors d'une déformation par *skin pass*





- Ⓐ tôle recuite
- Ⓑ état de livraison (R_{e0}) déformé par *skin pass*
- Ⓒ après temps de vieillissement t_1 (R_{e1})
- Ⓓ après temps de vieillissement $t_2 > t_1$ (R_{e2})
- A_1 allongement au *skin pass*
- A_p allongement à la fin du palier
- Ⓔ évolution normale

Etude de texte : Revêtement, Protection, Contact alimentaire, Recyclage des emballages métalliques

Liste des documents

1. TI F1310 Revêtements intérieurs pour emballages métalliques
2. TI M235 Vieillissement des aciers
3. « Une vie de fer-blanc » J.-L. VIGNES, G. ANDRÉ, BULLETIN DE L'UNION DES PHYSICIENS Vol. 88, Avril 1994
4. ARCELOR MITTAL Catalogue Aciers pour l'emballage 2013
5. L'industrie du fer blanc et des emballages métalliques. R. Lefaux. 1947
6. Guide des bonnes pratiques d'hygiène et de fabrication pour denrées alimentaires. SNFBM
7. Cours corrosion. EICNAM. F. Menan 2018
8. TI M2345 v1 Récupération et recyclage de l'aluminium. Stratégie
9. Site web contactalimentaire.com

Questions

Notions de corrosion électrochimique

1. On peut facilement obtenir une pile électrochimique en trempant un morceau de cuivre et un morceau de zinc dans un électrolyte. En utilisant les données du tableau ci-dessous (tableau des potentiels d'équilibre liés aux réactions d'oxydo-réduction des métaux), déterminer le métal de la pile qui sera consommé. En déduire la cathode et l'anode. Déterminer la tension maximale de la pile constituée.

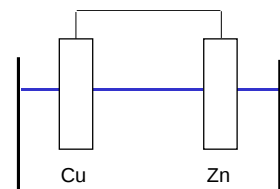


Tableau 9.3 Échelle des potentiels standard E_h d'oxydoréduction de quelques métaux par rapport à une électrode à hydrogène.

Métal	Réaction	Potentiel E_H (V)
Au	$\text{Au} \rightleftharpoons \text{Au}^{3+} + 3\text{e}$	+ 1,50
Pt	$\text{Pt} \rightleftharpoons \text{Pt}^{2+} + 2\text{e}$	+ 1,19
Pd	$\text{Pd} \rightleftharpoons \text{Pd}^{2+} + 2\text{e}$	+ 0,99
Hg	$\text{Hg} \rightleftharpoons \text{Hg}^{2+} + 2\text{e}$	+ 0,85
Ag	$\text{Ag} \rightleftharpoons \text{Ag}^+ + \text{e}$	+ 0,80
Hg	$2 \text{Hg} \rightleftharpoons \text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}$	+ 0,79
Cu	$\text{Cu} \rightleftharpoons \text{Cu}^+ + \text{e}$	+ 0,52
Cu	$\text{Cu} \rightleftharpoons \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}$	+ 0,34
Référence : Hydrogène	$\text{H}_2 \rightleftharpoons 2 \text{H}^+ + 2\text{e}$	0
Pb	$\text{Pb} \rightleftharpoons \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}$	- 0,13
Sn	$\text{Sn} \rightleftharpoons \text{Sn}^{2+} + 2\text{e}$	- 0,14
Ni	$\text{Ni} \rightleftharpoons \text{Ni}^{2+} + 2\text{e}$	- 0,25

- Un métal plongé dans l'eau peut se corroder alors qu'il n'est pas en contact avec un autre métal, comme dans la question précédente. Expliquer pourquoi la dissolution anodique d'un métal est possible dans l'eau.
- Le pH peut avoir une influence importante sur les mécanismes et les cinétiques de corrosion. L'éprouvette utilisée pour les essais de corrosion de la Fig 2 est représentée ci-dessous. Pour un pH = 2,6, estimer la perte d'épaisseur après 1 an (on supposera une dissolution uniforme sur l'ensemble de l'éprouvette). Même question pour pH = 9.

Donnée : masse volumique de l'aluminium 2700 kg/m^3

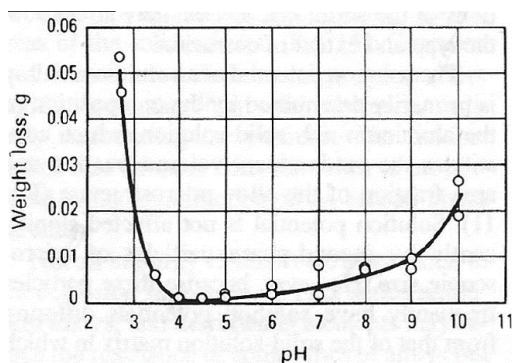
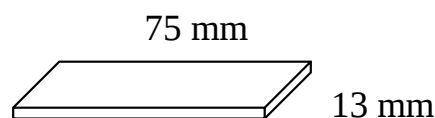


Fig. 2 Weight loss of alloy 3004-H14 exposed 1 week in distilled water and in solutions of various pH values. Specimens were $1.6 \times 13 \times 75 \text{ mm}$ ($0.06 \times 0.5 \times 3 \text{ in.}$). The pH values of solutions were adjusted with HCl and NaOH. Test temperature was 60°C (140°F).



épaisseur 1,6 mm

Corrosion du fer blanc, protection par l'étain

- Détailler le rôle de l'étain dans la protection du fer blanc. La complexité des phénomènes de corrosion intérieure du fer blanc nous amène à quelle solution technique ?
- Quelle est l'influence de la température sur les mécanismes de corrosion du fer blanc ? Quantifier cette influence

Revêtement intérieur et extérieur

6. En quels matériaux sont les vernis utilisés pour protéger les emballages métalliques ?
7. Lors du vernissage du fer blanc, les températures et temps de cuisson des vernis polymères sont-ils susceptibles de faire vieillir le matériau ? Si oui, quelles modifications métallurgiques et mécaniques ce vieillissement induit-il ?
8. Pour éviter ce vieillissement, le doc ARCELOR parle d'« interstitial free steels ». Quel est le principe de fonctionnement des aciers IFS ? En particulier, pourquoi ne sont-ils pas sensibles au vieillissement lors de la cuisson du vernis ?
9. En quoi consiste l'opération de rechampissage, opération appliquée après soudure du corps de boîte ?
10. Pourquoi ajoute-t-on des pigments dans un vernis ?

Contact alimentaire et matériaux

11. Pour la composition du fer noir, du fer blanc et des aciers inox, lister les éléments chimiques ayant des limites d'acceptabilité explicitement définies
12. Quels sont les objets en fonte destinés à entrer en contact direct avec des produits alimentaires et à usage répétitif ?

Recyclage

13. Qu'appelle-t-on les métaux de première fusion et les métaux de deuxième fusion ?
14. Détailler les étapes de recyclage des boîtes boisson aluminium

Correction

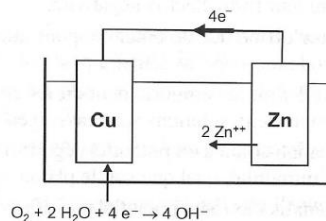
Notions de corrosion électrochimique

1/

9.3 Corrosion galvanique

1. Le métal consommé sera le zinc : le potentiel du zinc ($-0,76$ V) est inférieur à celui du cuivre ($+0,34$ V). Dans la pile formée, le zinc sera automatiquement en position d'anode, donc siège d'une réaction d'oxydation, alors que le cuivre sera en position de cathode. Le zinc sera donc consommé au bénéfice du cuivre.

2. Circulation des électrons et des ions métalliques :



3. Tension maximale de la pile :

$$ddp(Cu-Zn) = E_H(Cu) - E_H(Zn) = 0,34 - (-0,76) = 1,1 \text{ V}$$

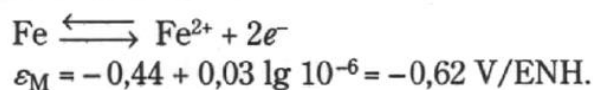
Métal	Réaction	Potentiel E_H (V)
Co	$\text{Co} \rightleftharpoons \text{Co}^{2+} + 2e$	- 0,28
Cd	$\text{Cd} \rightleftharpoons \text{Cd}^{2+} + 2e$	- 0,40
Fe	$\text{Fe} \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+} + 2e$	- 0,44
Cr	$\text{Cr} \rightleftharpoons \text{Cr}^{3+} + 3e$	- 0,74
Zn	$\text{Zn} \rightleftharpoons \text{Zn}^{2+} + 2e$	- 0,76
Cr	$\text{Cr} \rightleftharpoons \text{Cr}^{2+} + 2e$	- 0,91
Mn	$\text{Mn} \rightleftharpoons \text{Mn}^{2+} + 2e$	- 1,18
Zr	$\text{Zr} \rightleftharpoons \text{Zr}^{4+} + 4e$	- 1,53
Ti	$\text{Ti} \rightleftharpoons \text{Ti}^{2+} + 2e$	- 1,63
Al	$\text{Al} \rightleftharpoons \text{Al}^{3+} + 3e$	- 1,67
Mg	$\text{Mg} \rightleftharpoons \text{Mg}^{2+} + 2e$	- 2,37
Na	$\text{Na} \rightleftharpoons \text{Na}^+ + e$	- 2,71
Ca	$\text{Ca} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2e$	- 2,87
K	$\text{K} \rightleftharpoons \text{K}^+ + e$	- 2,92
Li	$\text{Li} \rightleftharpoons \text{Li}^+ + e$	- 3,05

2/ Pour chaque système (Fe/Fe^{2+} , Cu/Cu^{2+}), un potentiel standard d'électrode est alors défini.

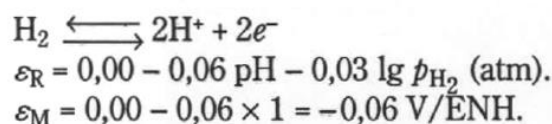
La connaissance des potentiels standards d'électrode permet de prédire les réactions se produisant lorsque deux « systèmes » sont reliés.

Les couples $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_3\text{O}^+$ et $\text{OH}^-/\text{H}_2\text{O}$ constituent eux aussi des « systèmes ».

Exemple : pour une plaque de fer en contact avec une solution acide de $\text{pH} = 1$, d'activité $10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}$ en Fe^{2+} , le système donneur envisageable est :

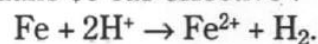


Le système accepteur envisageable est :



(on prend $p_{\text{H}_2} = 1 \text{ atm}$: pression de dégagement du gaz).

Ici $\varepsilon_R > \varepsilon_M$, la corrosion est thermodynamiquement possible et dans ce cas effective :



Le fer se corrode uniformément sous forme d'ions Fe^{2+} entrant en solution, avec dégagement d'hydrogène au contact de la plaque métallique.

La condition précédente permet seulement de dire si la corrosion est possible ou impossible dans des conditions expérimentales précises. Elle n'indique en aucun cas la vitesse à laquelle aura lieu le phénomène de corrosion. On pourrait avoir une condition thermodynamique « favorable » et ne constater aucune corrosion décelable du métal.

3/ Création échantillon proportionnel $t_0=1,6$

- $e = 1,6 \text{ mm} = 1 \times t_0$

- $l = 13\text{mm} = 8,125 \times t_0$
- $L = 75\text{mm} = 46,875 \times t_0$

Donc $V_0 = t_0 \times 8,125.t_0 \times 46,875.t_0 = 8,125 \times 46,875.t_0^3$

$V_f = 8,125 \times 46,875.t_f^3$

Raisonnement : Masse perdue > volume perdu > volume final > t_f > épaisseur finale = $1 \times t_f$

	pH=2,6	pH=9
Masse perdue sur 1 semaine (g) (lecture graphe)	0,05	0,009
Masse perdue sur 52 semaines (g)	2,6	0,468
Masse volumique alu (kg/m ³)	2700	2700
Masse volumique alu (g/mm ³)	0,0027	0,0027
Volume perdu (mm ³)	962,96	173,33
épaisseur initiale e_0 (mm)	1,6	1,6
largeur l_0 (mm)	13	13
longueur initiale L_0 (mm)	75	75
l/e	8,125	8,125
L/e	46,875	46,875
V initial échantillon V_0 (mm ³)	1560	1560
Masse initiale (g)	4,212	4,212
Volume final (mm ³) : V_0 - Volume perdu	597,04	1386,67
Épaisseur finale e_f (mm)	1,16	1,54
Largeur finale l_f (mm)	9,44	12,50
Longueur finale L_f (mm)	54,45	72,11

Corrosion du fer blanc, protection par l'étain

Question Détailler le rôle de l'étain dans la protection du fer blanc. La complexité des phénomènes de corrosion intérieure du fer blanc nous amène à quelle solution technique ?

Sources

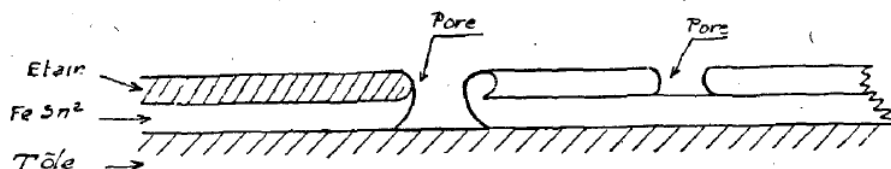
- « Une vie de fer-blanc » p630-632 ; p639-642
- L'industrie du fer blanc et des emballages métalliques. R. Lefaux. 1947

Réponse

L'industrie du fer blanc et des emballages métalliques. R. Lefaux. 1947

Le microscope montre (fig. 12), sur une feuille de fer blanc, même de première qualité, de petites cavités dans la couche d'étain.

Les unes atteignent seulement la couche Fe Sn^2 , les autres arrivent jusqu'au fer. Ces petites cavités ou pores se retrouvent dans la boîte souvent même accentuées par les opérations subies au cours de sa fabrication. C'est ainsi que ceux qui n'atteignaient que la couche Fe Sn^2 peuvent arriver au fer sous-jacent, par suite du manque de malléabilité de cet alliage.



Ces pores sont vraisemblablement le point de départ de l'attaque ultérieure de la boîte par les divers agents corrosifs (notamment les acides organiques qui y sont contenus).

« Une vie de fer-blanc » J.-L. VIGNES, G. ANDRÉ, BUP Vol. 88, n°763, 1994 p630-632 ; p639-642

Si le revêtement d'étain était parfait et surtout s'il ne subissait aucune détérioration, les propriétés chimiques du fer-blanc seraient celles de l'étain. Celui-ci s'oxyderait et la couche d'oxyde formé protégerait le métal d'une attaque ultérieure. C'est ce qui se produit pour les objets en étain pur. Mais, au cours de son utilisation, le fer-blanc subit diverses agressions qui se traduisent souvent par des rayures qui mettent l'acier à nu. Il faut distinguer l'oxydation de l'extérieur de la boîte de celle de l'intérieur.

A l'extérieur de la boîte, le revêtement d'étain permet d'éviter l'oxydation, à l'air, de l'acier. Si la présence de rayures met l'acier à nu, il se forme de la rouille. Cette oxydation n'est, en général, pas trop gênante pour la conservation des aliments car les vitesses de corrosion sont réduites, à condition que les boîtes ne soient pas conservées dans des atmosphères trop humides ou salines. La présence de rouille est seulement préjudiciable à l'aspect esthétique de la boîte.

A l'intérieur de la boîte, il faut, du point de vue de la corrosion, prendre en compte la présence des deux métaux, étain et fer. Ils sont en contact par l'intermédiaire du contenu de l'emballage qui est souvent, au moins en partie, sous forme de solution. On a ainsi une pile formée par les deux métaux dans un électrolyte. La connaissance de la résistance à la corrosion intérieure des boîtes en fer-blanc est fondamentale car elle détermine la durée de conservation des aliments dans ces boîtes. Les problèmes rencontrés : perforation des boîtes, gonflement (ou bombage), mauvais goût des aliments (si à l'origine ils étaient de bonne qualité) sont liés à des phénomènes de corrosion intérieure.

Les potentiels d'électrode normaux en solution aqueuse des couples mis en jeu sont les suivants [3] :

$$E_o (\text{Sn}^{2+}/\text{Sn}) = -0,14 \text{ V} \quad E_o (\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}) = -0,44 \text{ V}$$

D'après ces valeurs, le fer serait oxydé préférentiellement à l'étain. Ces valeurs sont données dans des conditions bien définies au niveau du pH, de la nature de l'électrolyte... Dans le cas des aliments conservés dans des emballages en fer-blanc, la valeur acide du pH, l'absence d'oxygène, la complexation des ions de l'étain... font que, en général, c'est l'étain qui perdra plus facilement ses électrons et qui donc s'oxydera et ainsi protégera le fer de la corrosion en jouant le rôle d'une anode sacrificielle au moins tant qu'il reste de l'étain (Figure 3a).

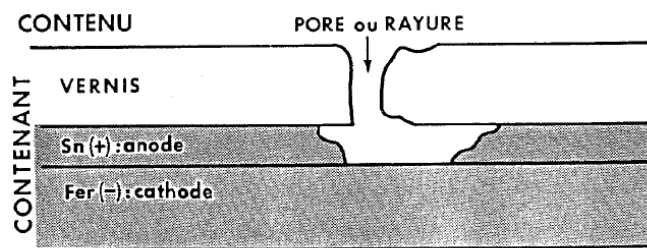


Figure 3a : Corrosion de l'étain : rôle d'anode sacrificielle joué par l'étain, d'après Fer-blanc, fer-chromé, des produits au service de la clientèle, document Sollac.

En général, l'attaque de l'étain (action désétamante) est lente et la durée de vie de la boîte est déterminée par l'épaisseur d'étain en contact avec un aliment donné. Toutefois, depuis quelques années, on note une augmentation de la teneur en ions nitrates de nombreux aliments, en particulier des légumes. Cela se traduit par un désétamage très rapide et des risques de perforation de la boîte par attaque de l'acier après disparition de l'étain. Cette forte action désétamante entraîne, lorsque à son tour l'acier est oxydé, un dégagement important de dihydrogène qui peut se traduire par une déformation de la boîte (gonflement ou bombage).

Pour d'autres aliments, en particulier les boissons carbonatées, les phénomènes de corrosion sont inversés (Figure 3b et expériences proposées au chapitre 3.). C'est ce qui se produit pour des boissons pétillantes (limonade, cola...) : le fer est attaqué et passe en solution sous forme d'ions ferreux qui à des teneurs très faibles, de l'ordre de quelques milligrammes par litre, donnent un goût particulièrement désagréable à la boisson. Lorsque les phénomènes de corrosion sont inversés, le fer n'est plus protégé et à la moindre rayure, il y a perforation rapide de la boîte.

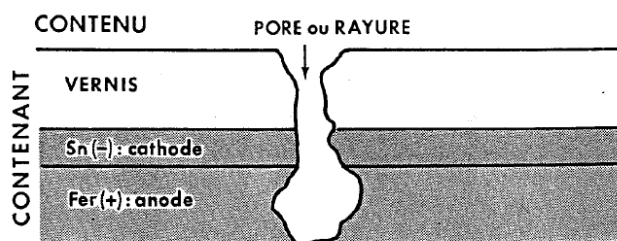


Figure 3b : corrosion du fer, d'après Fer-blanc, fer-chromé, des produits au service de la clientèle, document Sollac.

L'industrie du fer blanc et des emballages métalliques. R. Lefaux. 1947 p20-22

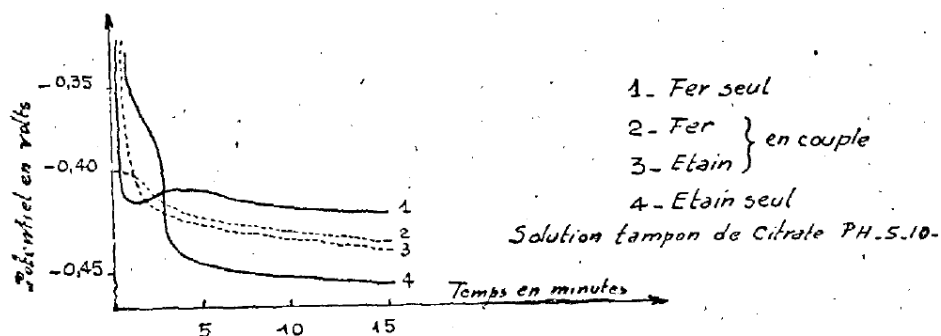
1° Actions des acides organiques — Corrosion du fer-blanc

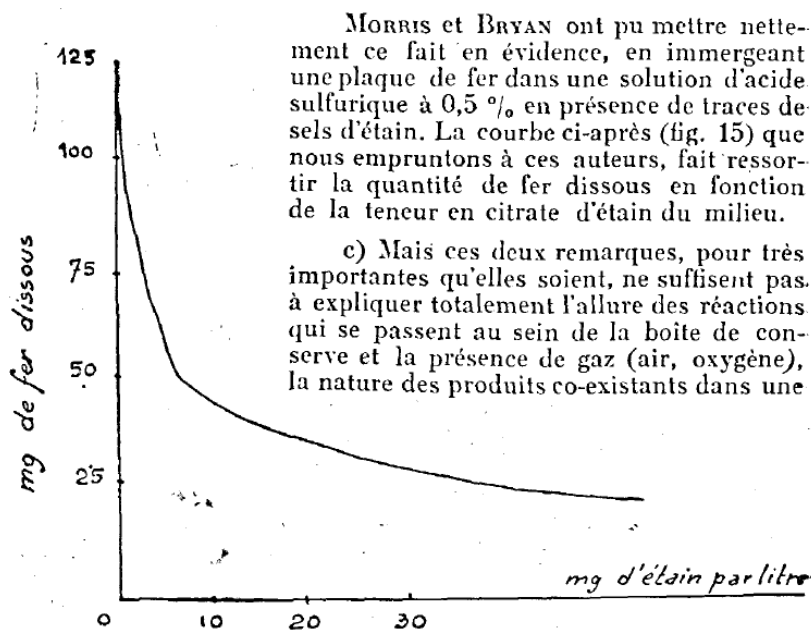
Cette corrosion lente est responsable de graves pertes, subies de tout temps parmi les stocks de conserves. Aussi de nombreux auteurs se sont-ils occupés de cette importante question (KOHMAN, SANBORN, HOAR, CULPEPPER, MOON, GIRE, CHEFTEL, NEHRING, BRYAN, MORRIS). Ils sont, dans l'ensemble, d'accord pour considérer la boîte de conserve comme un élément de pile : deux métaux (fer et étain), en contact, forment un circuit fermé sur un électrolyte (jus de la boîte plus ou moins chargé en sels) où passe un courant électrique, allant de l'anode (négative) à la cathode (positive), à travers l'électrolyte. La source du courant provient de la dissolution d'un des deux métaux (le métal anodique), pendant que l'autre (métal noble ou cathodique) reste intact. Quel est, du fer ou de l'étain, le métal anodique et quel est le cathodique ? L'échelle des tensions (tableau ci-dessous), nous montre que l'étain est cathodique par rapport au

Mg	Al	Zn	Fe	Cd	Co	Ni	Sn	Pb	H	Sb	As	Bi	Cu	Hg	Ag	Au
(tout métal placé à gauche du métal de base peut constituer, théoriquement, un revêtement protecteur inhibiteur ; inversement, il activera la corrosion dans les parties à nu s'il est placé à droite du métal de base).																

fer. La dissolution ou corrosion de ce dernier doit donc être accélérée par l'étain. C'est, en effet, ce que l'on constate lorsque fer et

a) Mais ces mêmes auteurs se sont aperçus que si l'électrolyte contient des acides capables de donner des sels complexes stables avec l'étain (1) (acides acétique, citrique, malique, lactique, oxalique), la force électromotrice du couple étain-fer se trouve rapidement inversée. L'étain devient métal anodique et protège ainsi le fer de la corrosion. C'est généralement le cas de la boîte de conserves qui contient les sels d'acides précités. L'étain se dissout en quantité notable, les quantités de fer qui passent en solution sont minimales et l'hydrogène, se dégageant sur le fer, forme autour de ce dernier une pellicule et le phénomène tend à s'arrêter par suite de la polarisa-





— Fig. 15 —

même boîte et par suite, leurs réactions diverses et simultanées vis-à-vis du fer et de l'étain nous font prévoir qu'elles auront une répercussion sur l'allure du phénomène électrolytique. L'acidité du milieu, s'exerçant sur les pores qui existent fatalement — même sur un fer blanc bien préparé — est le point de départ de la corrosion, mais cette dernière sera influencée par de nombreux facteurs qui en modifieront la vitesse.

La complexité des phénomènes de corrosion intérieure du fer blanc nous amène à quelle solution technique ?

Source : Une vie de fer-blanc » J.-L. VIGNES, G. ANDRÉ, BUP Vol. 88, n°763, 1994 p630-632

Réponse : « Pour ces diverses raisons, l'emploi d'un vernissage intérieur des boîtes s'est généralisé et permet de conserver des aliments à action désétamante rapide ou des boissons carbonatées (limonade, cola, bière...). Le vernis n'étant jamais parfaitement imperméable, la durée de conservation des aliments reste limitée à quelques années »

Question : quelle est l'influence de la température sur les mécanismes de corrosion du fer blanc ? Quantifier cette influence à l'aide des documents donnés.

Sources

- « Une vie de fer-blanc » J.-L. VIGNES, G. ANDRÉ, BUP Vol. 88, n°763, 1994 p639-642
- L'industrie du fer blanc et des emballages métalliques. R. Lefaux. 1947

Réponse

δ) *Température ambiante.* — Le stockage des boîtes à une température élevée accélère les réactions chimiques et notamment la corrosion. C'est un fait courant, en effet, de voir des boîtes — présentant un début de corrosion — bomber rapidement sous l'action des fortes chaleurs de l'été.

Une vie de fer-blanc J.-L. VIGNES, G. ANDRÉ p632 : « On estime qu'une élévation de température de 10°C multiplie, en moyenne, par deux la vitesse de corrosion intérieure. »

Revêtement intérieur et extérieur

Question : En quels matériaux sont les vernis utilisés pour protéger les emballages métalliques ?

Sources : Doc SNFBM p38

Réponse

Dans leur grande majorité, les boîtes métalliques possèdent un revêtement organique sur la surface en contact avec les aliments pour isoler le métal du contenu :

C'est en particulier le cas :

- des boîtes embouties en acier ou aluminium ainsi que des couvercles en aluminium
- d'une très grande partie des corps de boîtes 3 pièces et de la majorité des fonds en acier.

Nature des revêtements organiques placés au contact des aliments :

Il s'agit de revêtements choisis le plus souvent parmi les familles chimiques bien connues pour leur inertie sur le plan organoleptique : époxy-phénolique, époxy-aminoplaste, organosol vinylique, polyester.

Le choix s'effectue en fonction du métal, du mode de mise en forme pour la fabrication de la boîte, du contenu de la boîte et de la durabilité attendue pour la denrée appertisée.

Question : Lors du vernissage du fer blanc, les températures et temps de cuisson des vernis polymères sont-ils susceptibles de faire vieillir le matériau ? Si oui, quelles modifications métallurgiques et mécaniques ce vieillissement induit-il ?

Sources : F1310 ; M235 ; Arcelor

Réponse

Le vieillissement des aciers c'est quoi ? Le vieillissement est une évolution dans le temps des propriétés des matériaux à des températures proches de la température ambiante. Les aciers sont formés de grains dont la structure cristalline est stable et modifiable seulement par des transformations de phase à haute température ou par des précipitations de composés en général au-dessus de 500°C. De ce fait, les propriétés des aciers n'évoluent normalement pas en fonction du temps.

Il existe néanmoins un phénomène d'évolution de propriétés à basse température en relation avec la diffusion d'atomes interstitiels mobiles de carbone et d'azote sous certaines conditions : c'est ce phénomène que l'on désigne par vieillissement des aciers. Le terme de vieillissement est donc réservé à l'évolution dans le temps entre la température ambiante et 300°C des propriétés des aciers ferritiques ou ferrito-perlitiques.

Lorsqu'un acier doux est chauffé à une température suffisamment élevée pendant un temps suffisamment long, la diffusion des atomes de carbone et d'azote vers les dislocations peut se produire et mener au blocage de ces dislocations par des rassemblements d'atomes de C et azote

Lors du vernissage du fer blanc, les températures et temps de cuisson des vernis polymères sont-ils susceptibles de faire vieillir le matériau ?

OUI, lors du vernissage du fer blanc, les températures et temps de cuisson des vernis polymères sont susceptibles de faire vieillir le matériau (F1310 tableau 4 p7 ; M235 fig 5 p5)

Tableau 4 – Cuisson des vernis		
Type de four	Température	Durée
Étuve à feuille	190 à 210 °C	6 à 10 min
Étuve pour bande	230 à 270 °C	15 à 25 s
Four-tapis pour boîtes	200 à 210 °C	2 à 3 min

On peut représenter le vieillissement en fonction du temps pour une température donnée. C'est ce qui est présenté sur la figure 5 pour un acier carbone-manganèse du type E 36 ou A 52. Cette présentation classique du critère de vieillissement $\Delta\sigma / \sigma$ en pourcentage permet de mettre en évidence un certain nombre de paramètres : la température en premier lieu car le vieillissement est d'autant plus rapide que la température est élevée dans le cadre de certaines limites.

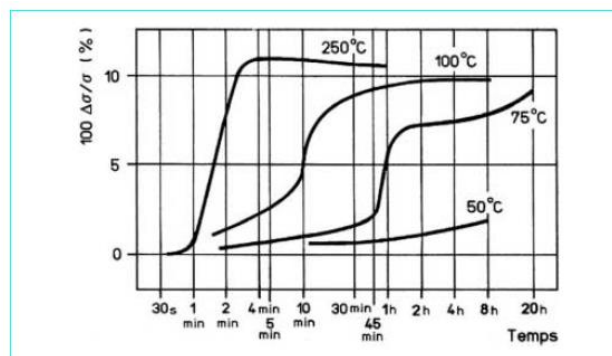


Figure 5 – Variation de $\Delta\sigma / \sigma$ avec le temps et la température de vieillissement (acier A 52 écroui de 10 %)

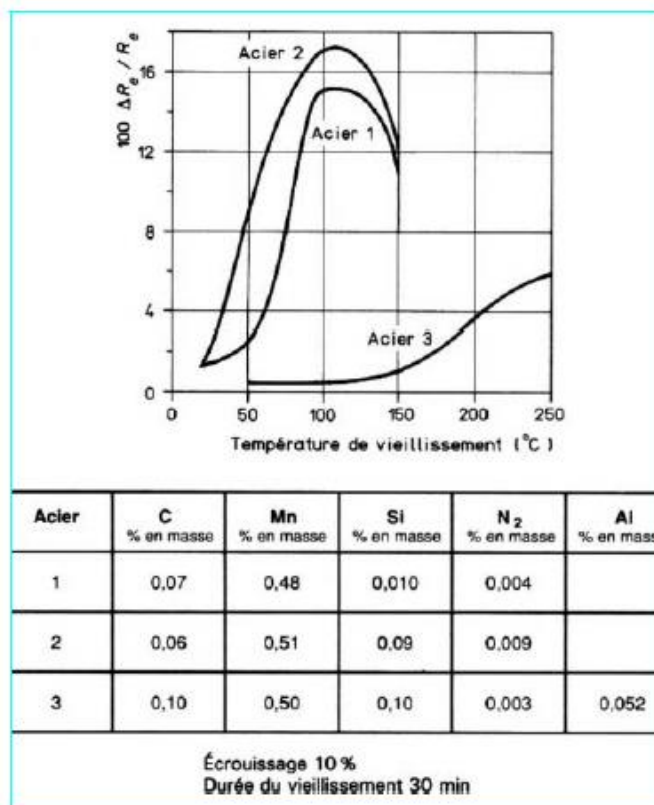


Figure 21 – Augmentation de la limite d'élasticité due au vieillissement en fonction de la température de vieillissement pour différents aciers

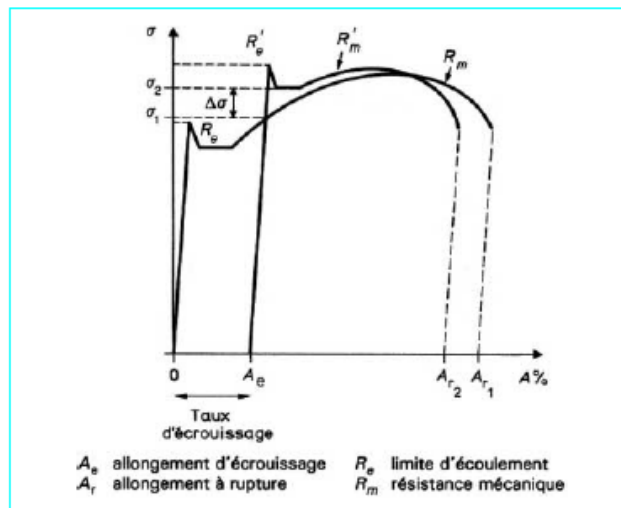


Figure 2 - Paramètres mesurés lors d'un essai de vieillissement par traction interrompue

Si oui, quelles modifications métallurgiques et mécaniques ce vieillissement induit-il ?

Le vieillissement des aciers lors de la cuisson du vernis peut provoquer le retour du palier de Re après vieillissement (retour des bandes de Piobert Luders)

Question : pour éviter ce vieillissement, le doc ARCELOR parle d'« interstitial free steels ».

Ageing in packaging steels is sometimes desirable (increased mechanical resistance by bake hardening) and sometimes detrimental (reduced ductility and formability). This is why several steel metallurgies are offered to tinplate users:

- non-ageing grades: currently BA grades
- ageing grades: currently CA grades (although additional overageing treatment can reduce the sensitivity of CA grades to ageing)
- interstitial-free (IF) steels (= Creasteel® grades)
IF steels are free from ageing, whatever the annealing process (CA or BA)

Quel est le principe de fonctionnement des aciers IFS ? En particulier, pourquoi ne sont-ils pas sensibles au vieillissement lors de la cuisson du vernis ?

Sources : M235 p16

Une des solutions utilisées pour éviter le retour des bandes de Luders est la fixation totale sous forme de carbures et de nitrures stables. Il y a disparition du palier pour ces dites « aciers sans interstitiels ». Ces aciers, où tout l'azote et tout le carbone sont fixés par du niobium ou du titane sous forme de nitrures et de carbures stables, ont des limites d'élasticité basses, n'ont pas de palier quel que soit le cycle thermique et ne sont donc pas sensibles au vieillissement (M235 p16)

Question : En quoi consiste l'opération de rechampissage, opération appliquée après soudure du corps de boîte ?

Sources : Doc SNFBM p51

Opération de protection des soudures électriques par application d'un vernis après soudage.

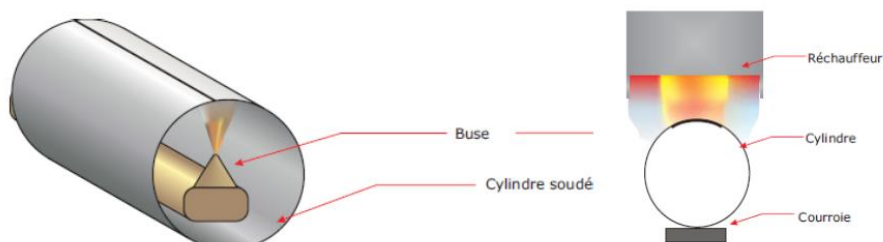


Figure 37: Principe du rechapissage

(Cordier 2015)

Question : Quels sont les objectifs d'un ajout de pigments dans un vernis ?

Sources : Doc SNFBM p38

Ces revêtements peuvent contenir des pigments de façon à :

- en modifier l'aspect : pigments blancs (exemple : oxyde de titane) ou pigments métalliques (exemple : aluminium)
- en augmenter les propriétés de barrière chimique : pigment permettant de « piéger » les composés soufrés (exemple : oxyde de zinc) des aliments, dans le cas des boîtes acier.

Contact alimentaire et matériaux

Pour la composition du fer noir, du fer blanc et des aciers inox, lister les éléments chimiques ayant des limites d'acceptabilité explicitement définis

3.2 Critères à utiliser

3.2.1 Composition de l'acier

L'acier constituant le support doit satisfaire les exigences spécifiées dans la fiche « Acier pour emballage (Fer noir) ».

3.2.2 Revêtement d'étain

La composition chimique de l'étain utilisé doit être conforme aux prescriptions définies par l'EN 610 pour la nuance Sn 99,85 à l'exception de la teneur en plomb qui doit être inférieure à 0,0100 %.

3.2.3 Teneurs en éléments indésirables du revêtement

Vérification de la teneur en plomb, cadmium, arsenic.

4. Limite d'acceptabilité

Teneurs maximales en éléments indésirables du revêtement :

Pb $\leq$ 0,0100 %
 Cd $\leq$ 0,0100 %
 As $\leq$ 0,030 %

Quels sont les objets en fonte destinés à entrer en contact direct avec des produits alimentaires et à usage répétitif ?

http://www.contactalimentaire.com/fileadmin/ImageFichier_Archive/contact_alimentaire/Fichiers_Documents/Brochure_JO/Note_2004_64/Note_2004_64_fonte.pdf

1. Domaine d'application

La présente fiche matériau concerne la fonte (alliage Fe, C) et les objets constitués exclusivement de fonte, qui à l'état de produits finis sont destinés à entrer en contact direct avec des produits alimentaires et à usage répétitif.

Les principaux exemples d'application sont les suivants :

- articles ménagers : plaques de cuisson, cocottes, grilles, hachoir, etc. ;
- équipements de l'industrie agroalimentaire : tuyaux, corps de machines, éléments de cuisson, etc..

Recyclage

Question : Qu'appelle-t-on les métaux de première fusion et les métaux de deuxième fusion ?

Sources : Doc SNFBM

- Métaux de première fusion : fabriqués à partir de minerais naturels conformes aux cahiers des charges.
- Métaux de deuxième fusion : Ils proviennent soit de la récupération des déchets de consommateurs ou de chutes industrielles et sont conformes aux exigences essentielles de la Directive EC 94/62.

Détailler les étapes de recyclage des boîtes boisson aluminium

TI M2345

Encadré 2 – Recyclage des boîtes boisson aluminium en boucle fermée

- Collecte séparative des boîtes boisson Al usagées (avec système de consigne ou organisation du ramassage...).
- Mise en balles ($1\,000 \times 800 \times 1\,000$ mm)
 masse volumique $< 0,5 \text{ t/m}^3$
 ou mise en paquets ($400 \times 400 \times 400$ mm)
 masse volumique $< 1,0 \text{ t/m}^3$ } pour transport
- Broyage, criblage, séparation magnétique. On trouve des installations de 2 à 20 t/h de capacité.
- Délaquage thermique à environ 500°C (juste en dessous de la température de fusion commençante du couvercle en A5182). Le délaquage doit détruire thermiquement les revêtements de l'aluminium et le joint élastomère d'étanchéité corps-couvercle. On compte environ 22 unités de délaquage aux États-Unis.
- Fusion des boîtes broyées, délaquées, préchauffées, en four réverbère à bassin extérieur avec dispositif d'immersion (vortex), en four électrique plus rarement.
- Transfert du métal liquide en four de maintien, apport de métal vierge (15 à 20 % minimum), mise au titre de l'alliage (chlorage).
- Traitement du métal en continu à la coulée : poche de dégazage, poche de filtration.
- Coulée verticale semi-continue en plaque de laminage de masse unitaire pouvant aller jusqu'à 8 t.
- Fabrication classique de tôle par laminage à partir des plaques.

Exercice : exigences fonctionnelles des emballages métalliques-ok

Ci-dessous des propriétés fonctionnelles des emballages. Indiquer si elles constituent un point faible ou un point fort des emballages métalliques. Les deux réponses sont parfois possibles !

	Point faible	Point fort
Résistance mécanique (contraintes mécaniques, chocs, pression interne...)		
Etanchéité (gaz, lumière, micro-organismes)		
Compatibilité alimentaire		
Masse		
Recyclabilité		
Durée de conservation sans besoin de réfrigération		
Image auprès des consommateurs		
Facilité de manutention (précautions à prendre, palettisation.....)		
Conductivité thermique		

Réponse

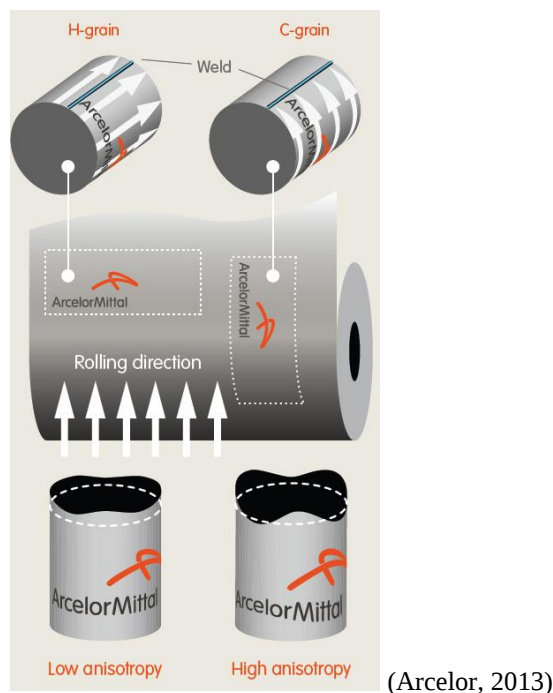
	Point faible	Point fort
Résistance mécanique (contraintes mécaniques, chocs, pression interne...)		x
Etanchéité (gaz, lumière, micro-organismes)		x
Compatibilité alimentaire		x
Masse	x	
Recyclabilité		x
Durée de conservation sans besoin de réfrigération		
Image auprès des consommateurs	Image peu « high-tech » ou « low-cost » (bière)	Image vintage (boite de biscuits)
Facilité de manutention (précautions à prendre, palettisation.....)	x (masse élevée)	x (comparé au verre)

Relations microstructure – propriétés mécaniques

Exercice : laminage d'une tôle

On réalise un emboutissage sur une tôle d'acier afin de produire une boîte boisson. En fonction du mode de prélèvement du flan à emboutir sur la tôle laminée d'acier, le résultat obtenu est bien différent. Ceci est dû à la forte anisotropie d'une tôle lorsqu'elle est laminée.

1. Rappeler la définition d'un matériau anisotrope.
2. Pourquoi une tôle laminée peut-elle être fortement anisotrope ?



Exercice : durcissement par écrouissage de l'alliage 1200

De nombreux alliages métalliques sont durcis par écrouissage, dont les alliages d'aluminium. Dans la désignation des alliages d'aluminium, la lettre H désigne l'état écroui, soit les alliages d'aluminium durcis par écrouissage. La nuance H18 correspond à une tôle de 1 mm d'épaisseur obtenue par déformation plastique depuis l'état O à partir d'une tôle de 4mm (O : état recuit : état le plus ductile. Généralement obtenu par traitement dit de recuit, traitement suivi d'aucun écrouissage).

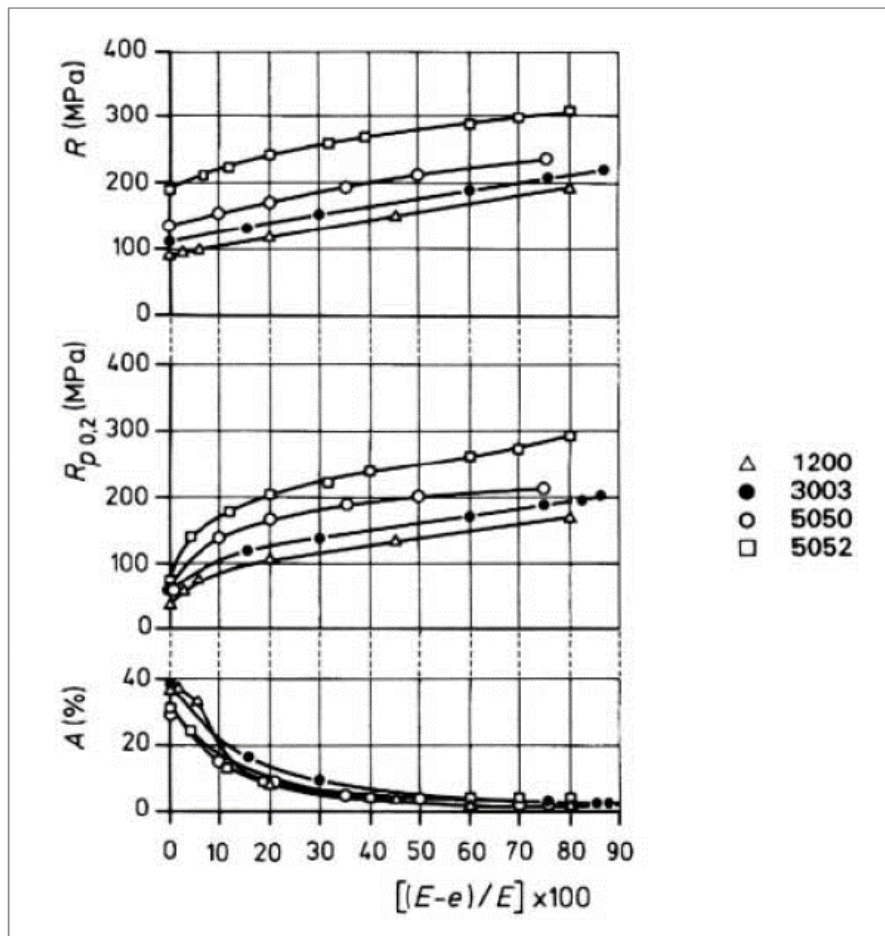


Figure 7 – Influence de l'écrouissage sur les caractéristiques mécaniques de traction de l'aluminium 1200 et des alliages 3003, 5050 et 5052 (d'après [45])

Techniques de l'Ingénieur

Le taux t d'écrouissage est donné par la formule :

$$t = 100 \cdot \frac{E - e}{E}$$

- E : épaisseur initiale
- e : épaisseur après écrouissage

Déterminer $R_{p0.2}$, R_m et $A\%$ pour l'alliage 1200 à l'état O et à l'état H18

Correction

Le taux d'écrouissage à l'état H18 est de 0,75%. Par lecture graphique :

- 1200 état O : R_m environ 90 MPa ; $R_{p0.2}$ environ 30 MPa ; $A\%$ environ 35 %
- 1200 état H18 : R_m environ 180 MPa ; $R_{p0.2}$ environ 160 MPa ; $A\% < 5$ %

Voir également tableau ci-dessous de la collection techniques de l'ingénieur.

Alliage	État métallurgique	Indice de résistance	Épaisseur e (mm)	Caractéristiques en traction			
				R_m	R_m	$R_{p0.2}$	A
				min. (MPa)	max. (MPa)	min. (MPa)	min. (%)
1100 et 1200	0 - H111		$0,35 \leq e \leq 12$	75	105	25	35
	H12	R10	$0,35 \leq e \leq 12$	95	130	75	8
	H22	R10 A	$0,35 \leq e \leq 12$	95	130	65	12
	H14	R11	$0,35 \leq e \leq 6$	110	150	95	6
	H24	R11 A	$0,35 \leq e \leq 6$	110	150	90	9
	H16	R13	$0,35 \leq e \leq 3,2$	130	170	110	4
	H26	R13 A	$0,35 \leq e \leq 3,2$	130	170	110	6
	H18	R15	$0,35 \leq e \leq 3,2$	150	–	130	3

Exercice : le système Fer-Carbone : relations structure/propriétés mécaniques

1/ Indiquer le nombre de phases, leur nature, leur composition chimique, leur fraction massique à 500°C pour un acier à 0,015%C, un acier à 0,6%C, un acier à 0,77%C, un acier à 1.2%C

On suppose que pour chaque acier, la dureté de l'alliage est une moyenne des duretés de chaque phase, pondérée par leur fraction massique.

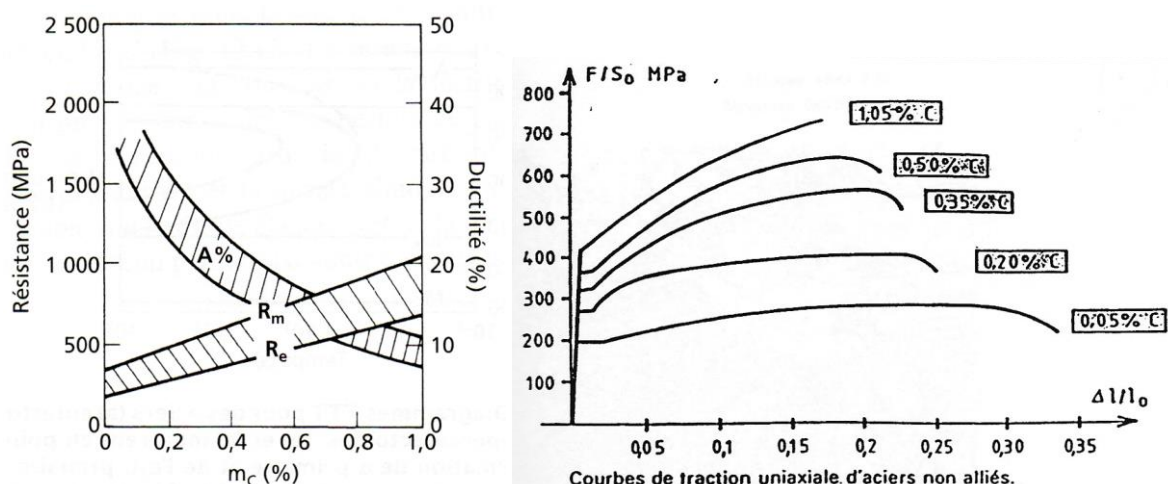
On donne $H_v(\text{ferrite } \alpha) = 80$ et $H_v(\text{Fe}_3\text{C}) = 810$

On suppose aussi que $R_m = 3 \cdot H_v$

2/ Estimer la dureté et la résistance en traction des 4 aciers de la question 1

3/ Tracer la fraction massique de cémentite et la résistance en traction R_m de chaque acier, en fonction de la teneur en carbone

4/ Expliquer alors les Figure 1 et 2 donnant R_e , R_m et $A\%$ pour des aciers à différentes teneurs en carbone



Données

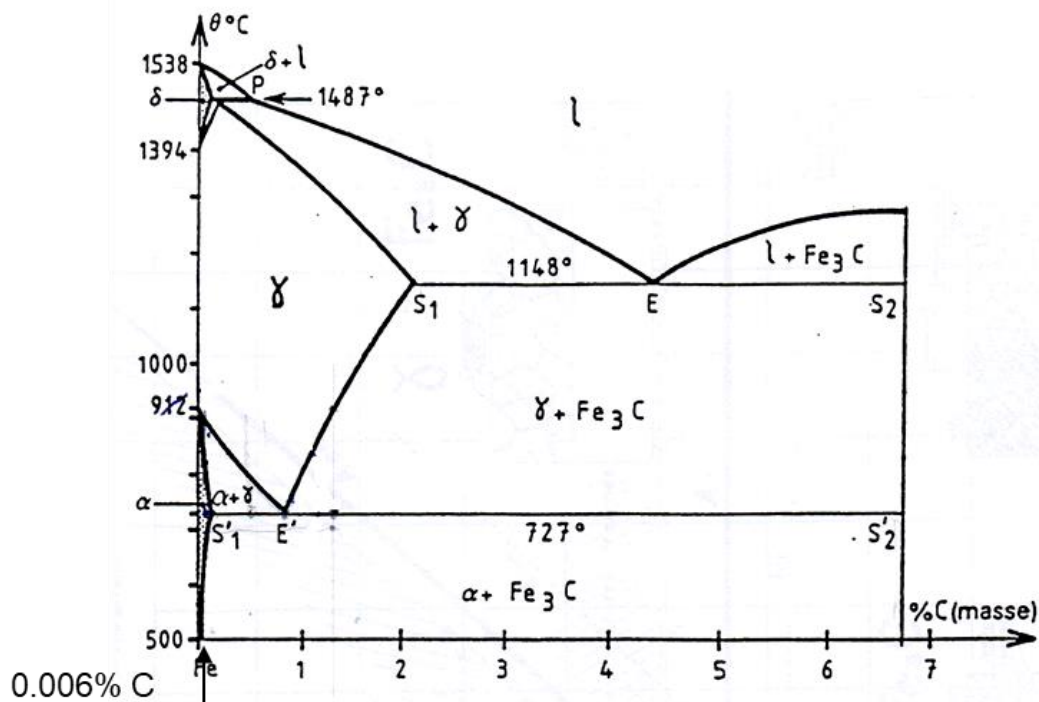


Diagramme d'équilibre métastable ou à cémentite

Abscisses des points principaux :

S_1 : 2,11 %	E : 4,30 %	S_2 : 6,67 %
S'_1 : 0,022 %	E' : 0,77 %	S'_2 : 6,67 %

Correction

Q1 et Q2/ Déterminer la constitution du matériau : càd indiquer le nombre de phases, leur nature, leur composition chimique càd leur %C et de Fe, leur fraction massique $fm\%$ à 500°C (**on considère qu'entre 500 et 20°C, le matériau n'évolue plus beaucoup**) pour un acier à 0,015%C, un acier à 0,6%C, un acier à 0,77%C, un acier à 1.2%C

Acier 0,015%C à 500°C

Le point (0,015%;500) tombe dans le domaine biphasé $\alpha + Fe_3C$

Nb phases : 2

Nature : $\alpha + Fe_3C$

Composition chimique des phases ?

Règle de l'horizontale

$m\%(C)$ dans α = 0,006%C

$m\%(C)$ dans Fe_3C = 6,67%C

Fraction massique des phases ?

Règle des segments inverses (on dit aussi règle des leviers) (lever rule)

$$fm\%(\alpha) = \frac{6,67 - 0,015}{6,67 - 0,006} \approx 99,87\%$$

$$fm\%(Fe_3C) = \frac{0,015 - 0,006}{6,67 - 0,006} \approx 0,13\%$$

NB : on vérifie que la somme des deux fm% fait bien 100%

$$Hv = Hv(\alpha) \cdot fm\%(\alpha) + Hv(Fe_3C) \cdot fm\%(Fe_3C)$$

Pour chaque acier, la règle de l'horizontale donne à chaque fois : ferrite α à 0,006%C et de la cémentite Fe_3C à 6,67%C.

%C	m%alpha	m%Fe3C	Hv	Rm
0,015	99,87%	0,1351%	81,0	243,0
0,600	0,911	8,9136%	145,1	435,2
0,770	0,885	11,4646%	163,7	491,1
1,200	0,821	17,9172%	210,8	632,4

Q3

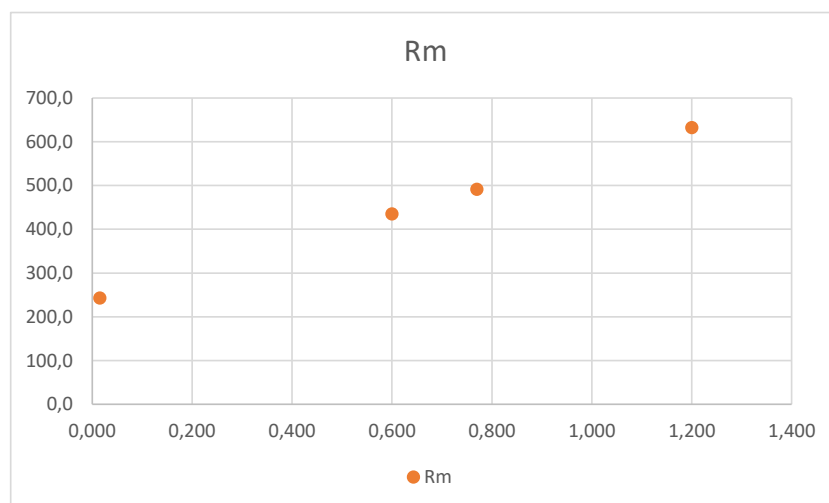
On constate quoi sur ces graphes ? Rm et fm%(Fe₃C) varient linéairement avec %C

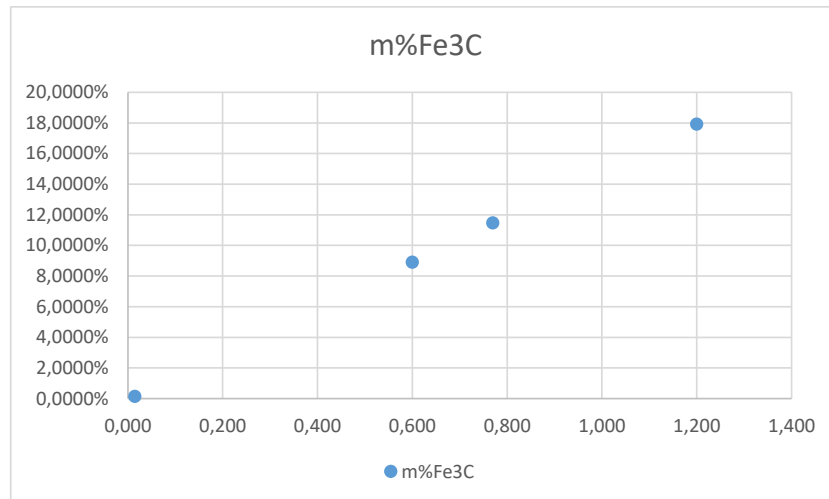
Par le calcul on peut le vérifier

$$fm\%(Fe_3C) = \frac{\%C - 0,006}{6,67 - 0,006} = \frac{1}{6,67 - 0,006} \%C - \frac{0,006}{6,67 - 0,006}$$

$$Rm = 3Hv = 3 * (Hv(\alpha) \cdot fm\%(\alpha) + Hv(Fe_3C) \cdot fm\%(Fe_3C))$$

$$= 3 * (Hv(\alpha) \cdot (1 - fm\%(Fe_3C)) + Hv(Fe_3C) \cdot fm\%(Fe_3C))$$





4/ Expliquer alors les graphes donnant Re, Rm et A% pour des aciers à différentes teneurs en carbone

Influence du %C :

Dureté Fe3C : 810 hv et Dureté ferrite alpha : 80 hv

DONC Fe3C = phase durcissante

OR fm%(Fe3C) croît linéairement avec %C, donc pas étonnant que Re et Rm augmentent linéairement avec %C

%C augmente → fm%(Fe3C) augmente → Re et Rm augmentent

MAIS quand %C augmente, le nombre d'interfaces entre Fe3C et la ferrite alpha augmentent (reprendre l'exercice sur le durcissement par précipitation du 28 mai).

OR ces interfaces sont des sites de fissuration

DONC la ductilité (quantifiée par A%) diminue quand %C augmente

%C augmente → fm%(Fe3C) augmente → nombre d'interfaces entre Fe3C et alpha augmentent → A% diminue

Traitements thermiques

Étude de cas : explosion d'une chaudière¹

Une rupture a eu lieu dans une conduite d'eau d'une chaudière produisant de la vapeur pour une usine chimique.

Un schéma de la chaudière est fourni. A sa base un récipient cylindrique contient de l'eau et des boues. Au sommet le réservoir contient de la vapeur et de l'eau. Les récipients sont reliés par 200 tubes dans lesquels l'eau circule. Les tubes sont chauffés de l'extérieur par des gaz chauds provenant d'un four. L'eau dans les tubes chauds va du réservoir à boue vers le réservoir à vapeur et l'eau dans les tubes froids suit le chemin inverse.

Par accident, certains tubes ont gonflé. Finalement, un des tubes s'est éventré.

L'objectif de cette étude de cas est de définir les caractérisations et essais à réaliser, puis d'analyser les résultats obtenus afin de déterminer les causes possibles de cette défaillance.

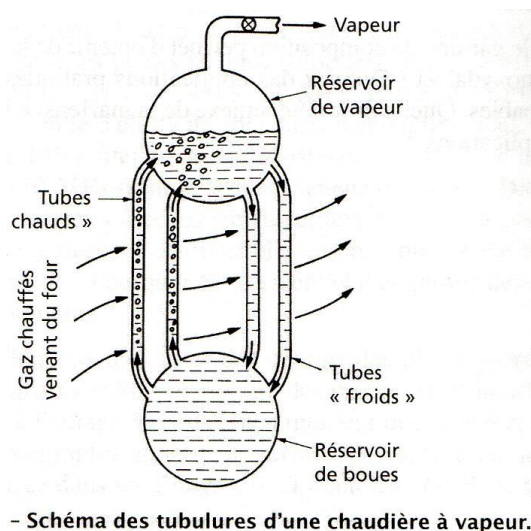
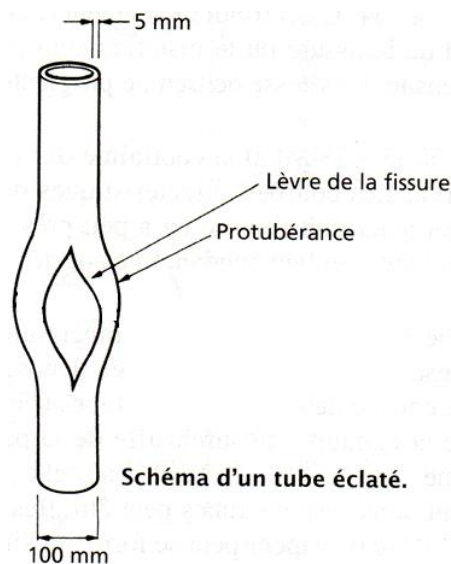
En tant que responsable matériaux de votre société, vous allez notamment chercher à savoir si les causes de cette défaillance sont dues à un matériau inadapté.

Données sur la chaudière et sur la défaillance

Tubes longueur 10m, $d_i=100\text{mm}$, épaisseur 5mm

Tubes en acier 0.18%C - 0.45%Mn - 0.20%Si

Pression 50 bars, $T_{\text{eau}}=264^\circ\text{C}$



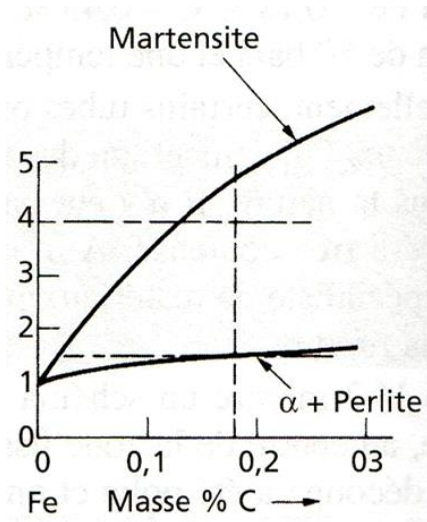
Questions

1. En premier lieu, quelle caractérisation (essai mécanique, analyse) proposez-vous ?
2. En déduire la microstructure du matériau le long de la fissure. Que vous indique cette microstructure ? (aidez-vous du diagramme de phases et du cours)

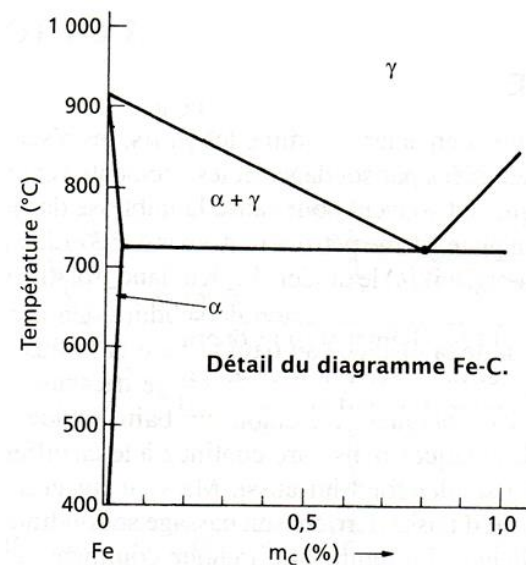
¹ Adapté d'une étude de cas décrite dans Ashby Jones Matériaux DUNOD (Ashby and Jones, 2014)

3. En fonction du résultat de la question précédente, et pour un tube de cette chaudière, quel mode d'endommagement peut-on craindre ?
4. Quelle hypothèse pouvez-vous alors faire sur le scénario de la rupture ?
5. Quelles hypothèses finales pouvez-vous formuler sur les causes de la surchauffe ?

Données matériaux



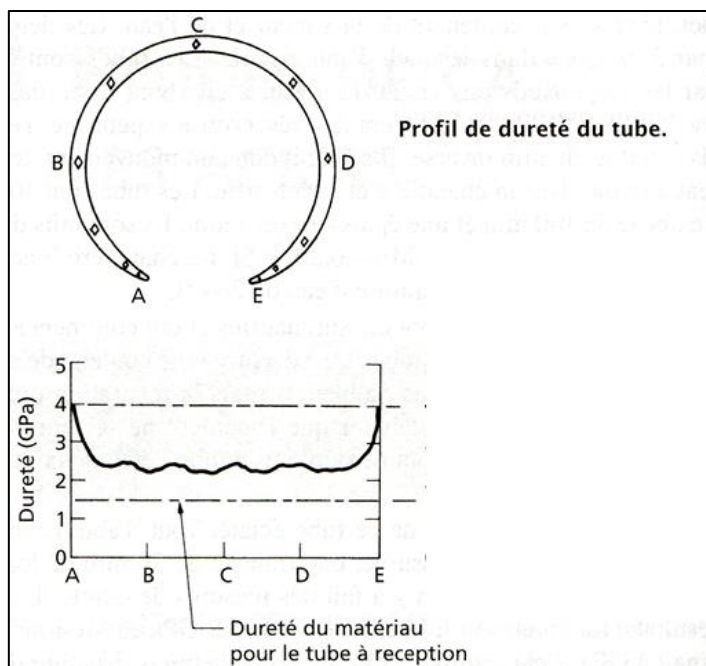
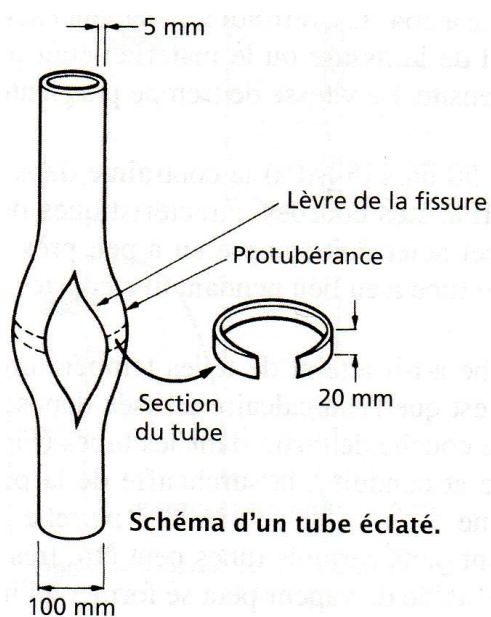
Dureté d'un acier ferrito-perlitique et d'un acier martensitique en fonction du % de carbone



Réponse

- Analyses et caractérisations réalisées à l'issue de la défaillance

On a réalisé un essai de dureté. Ci-dessous les résultats fournis par le laboratoire d'essai.

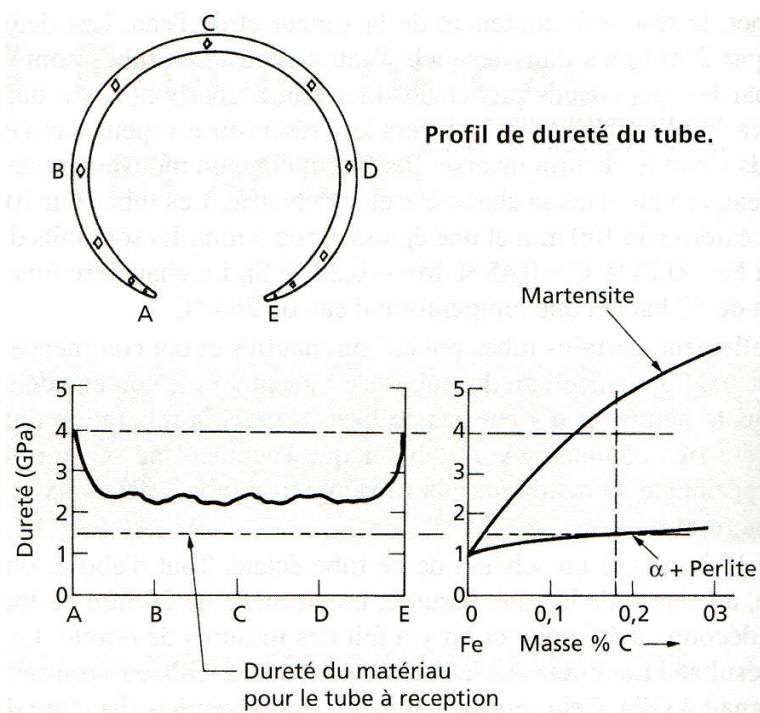


Analyse de l'essai de dureté

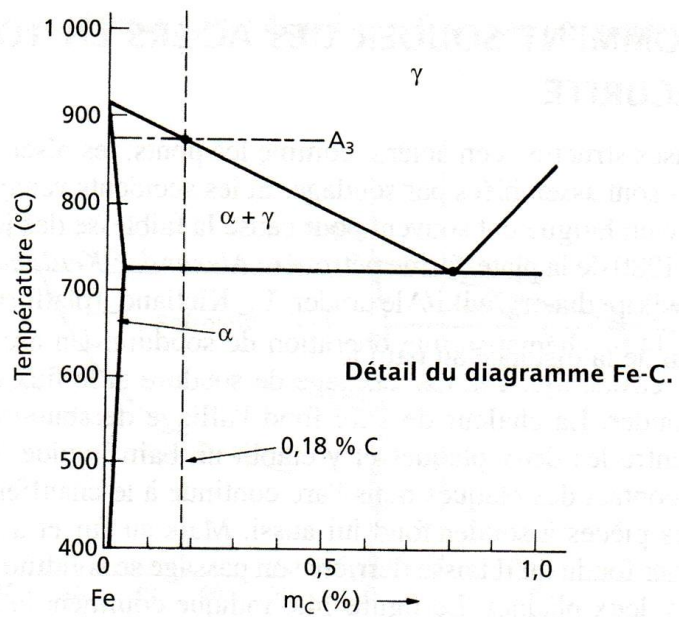
Il y a eu création de martensite en bord de fissure et de bainite loin de la fissure.

L'acier a certainement été surchauffé jusqu'au domaine austénitique (γ) puis trempé par l'eau à 264°C lors de la rupture.

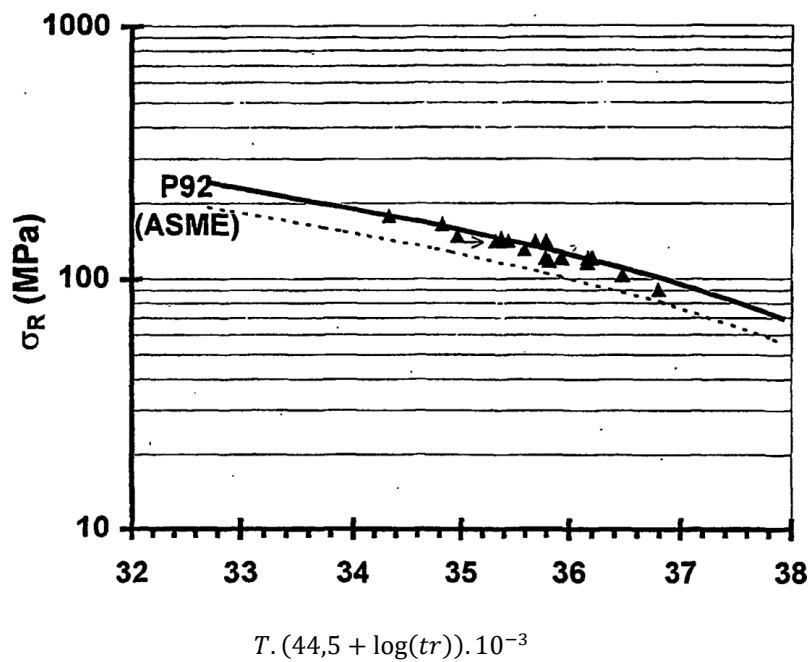
A quelle température a-t-il été surchauffé ?



Lecture de la température de surchauffe

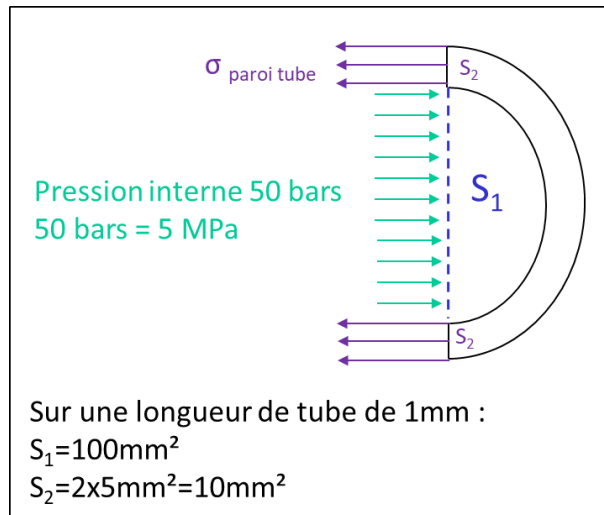


L'acier a connu une surchauffe à au moins $A_3=870^\circ\text{C}$



Courbe de fluage d'un acier 0,18%C

Calcul de la contrainte dans la paroi du tube



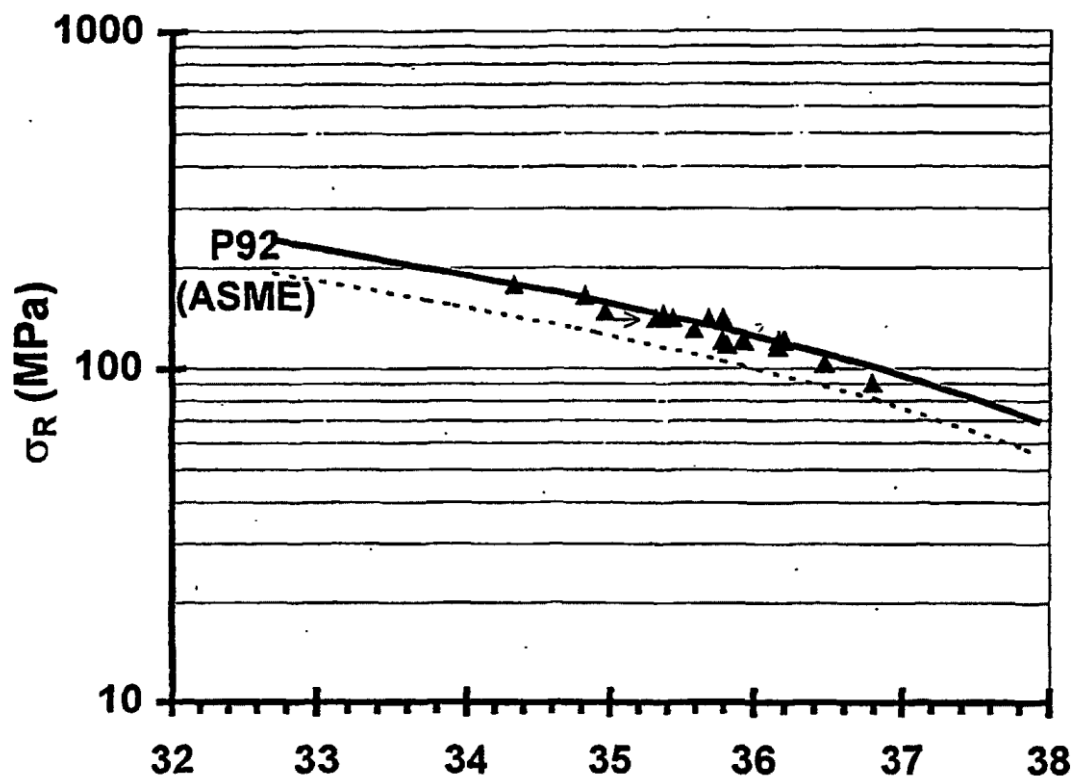
$$F = \text{pression} \cdot S_1 = 500 \text{ N}$$

$$\sigma_{\text{paroi tube}} = F/S_2 = 50 \text{ MPa}$$

Estimation du temps de rupture par fluage de l'acier à la température de surchauffe

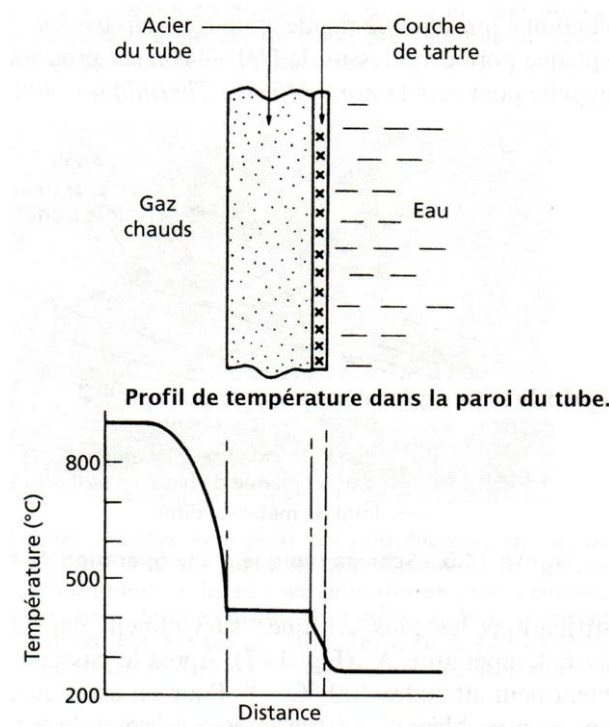
$\sigma_{\text{paroi tube}} = 50 \text{ MPa}$ et $T = 900^\circ\text{C}$. lecture graphique $t_{\text{rupture}} < 15 \text{ min}$.

Temps de rupture cohérent avec une rupture observée en une nuit donc l'acier a sûrement connu une surchauffe, ce qui a entraîné une rupture par fluage.



Causes de la surchauffe ?

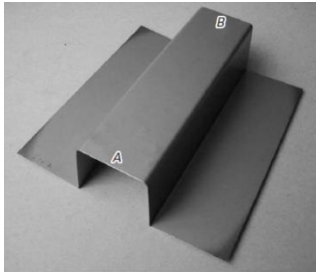
Hypothèses sur la cause de la surchauffe



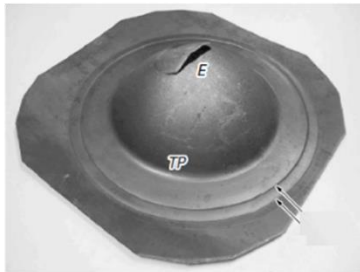
Procédés

Exercice : modes de déformation : pièces typiques

- Quels modes de déformation peut-on reconnaître sur les pièces ci-dessous ?



Embouti en « oméga »



Coupelle hémisphérique



Coupelle

Réponse

L'embouti dit en « oméga » est souvent cité comme l'archétype de la traction plane. Le métal est retenu latéralement par la pression de serre-flan et les efforts nécessités par son passage sur le rayon de matrice. Les bords de celle-ci étant parfaitement rectilignes, la déformation majeure est effectivement de type traction plane, dirigée perpendiculairement au grand axe. Néanmoins, les rives A et B de la pièce sont libres. Elles sont donc partiellement en traction uniaxiale, ce qui entraîne parfois un léger rétrécissement sur le nez de poinçon (non visible sur la figure).

Une coupelle hémisphérique gonflée par pression hydraulique, semble très proche de l'expansion pure. Le bord du flan est retenu par des accessoires appelés joncs qui rendent l'avalement du métal impossible, évitant ainsi le mode rétreint. La partie centrale est donc bien en expansion, mais il n'en est pas de même à la périphérie car, le périmètre ne variant pas, elle se trouve en traction large.

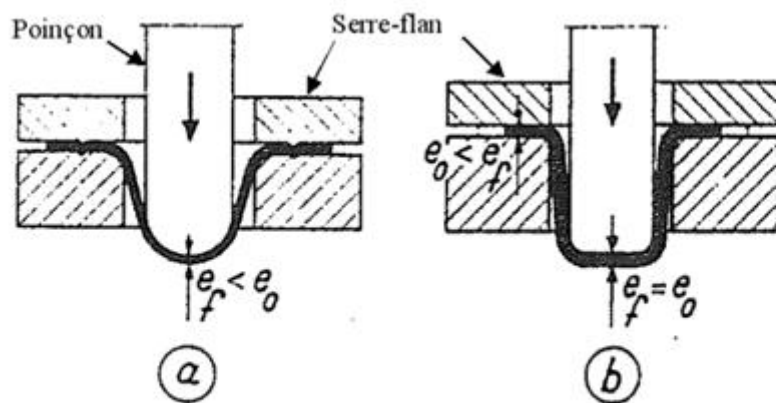
Coupelle à fond plat : le rétreint prédomine puisque l'on profite de l'avalement du bord du flan pour former la partie verticale appelée la jupe.. Par ailleurs, la jupe des godets subit successivement deux modes différents de déformation au cours de son emboutissage, d'abord du rétreint pur, tant que le métal considéré se trouve entre le serre-flan et la matrice (dans la collerette), puis de la traction plane quand il entre dans la jupe, ce qui s'explique bien en observant que sa largeur ne peut plus varier (diamètre du corps constant). On dit alors que le trajet de déformation est complexe.

Voir Doc : TI – m3180

Exercice : modes de déformation : influence du serre flan

Les joncs sont des rainures du serre-flan permettant de bloquer l'écoulement du flan lors de l'emboutissage.

- Indiquer, pour les cas a et b du schéma, le mode de déformation dominant (expansion ou rétreint)



Principaux modes de déformation par emboutissage. e_0 : épaisseur du flan à l'état initial, e_f : épaisseur du flan.

Réponse

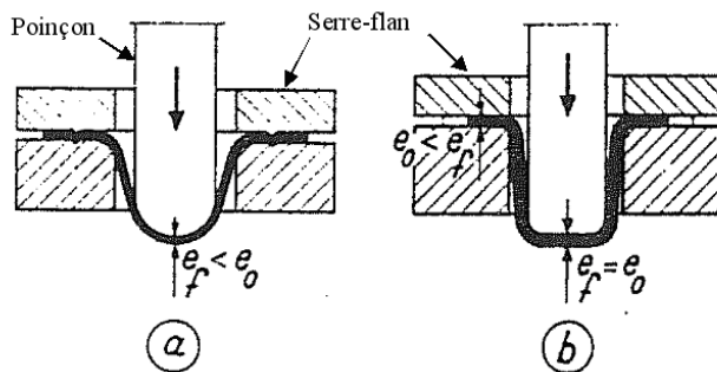


Figure 1.5 – Principaux modes de déformation par emboutissage. e_0 : épaisseur du flan à l'état initial, e_f : épaisseur du flan. (a) expansion, (b) rétreint [MAR 95]

Références

- Arcelor (2013) 'Steel for packaging - Product catalogue'. Available at: www.arcelormittal.com/packaging.
- Ashby, M. and Jones, D. (2013) *Matériaux. 1. Propriétés, applications et conception*. DUNOD.
- Ashby, M. and Jones, D. (2014) *Matériaux. 2. Microstructure et procédés de mise en oeuvre*. 4th edn. DUNOD.
- Castanié, B., Bouvet, C. and Guedra-Degeorges, D. (2013) 'Structures en matériaux composites stratifiés', *Conception et Production* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.51257/a-v2-bm5080>.
- Dupeux, M. and Gerbaud, J. (2010) *Exercices et problèmes de sciences des matériaux*. Paris: Dunod (Sciences sup).
- E28 Committee (no date) *Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International. Available at: <https://doi.org/10.1520/E0008-04>.
- Fanchon, J.-L. (1998) *Guide de Mécanique*. Nathan.
- Gardin, C. (2004a) 'Cours de Matériaux Composites'. ISAE-ENSMA.
- Gardin, C. (2004b) 'Mécanique de la Rupture'. ISAE-ENSMA.
- Hertz, J. (1999) 'Diagrammes d'équilibre - Alliages binaires', *Étude et propriétés des métaux* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.51257/a-v2-m70>.
- J. R. Davis & Associates and ASM International (eds) (1993) *Aluminum and aluminum alloys*. Materials Park, OH: ASM International (ASM specialty handbook).
- Mercier, J.P., Zambelli, G. and Kurz, W. (2002) *Introduction à la science des matériaux*. 3. éd., entièrement revue et augmentée. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (Traité de matériaux / [Hrsg.] Jean Pierre Mercier, 1).
- Mesplède, J. (2004) *Thermodynamique, matériaux, PC: nouveau programme*. Rosny-sous-Bois: Bréal éd (Les nouveaux précis Bréal).
- VIGNES and ANDRE (1994) *Une vie de fer-blanc Expériences sur l'élaboration, les propriétés et le recyclage d'un matériau*. BULLETIN DE L'UNION DES PHYSICIENS Vol 88. (no 763).