



«Gestion des risques industriels »

NEWS 53 - MAI 2021

Newsletter N°53 : CONDITIONS EXTREMES / RISQUES INDUSTRIELS

L'enfer des hautes températures & les caractéristiques mécaniques

Avec cette nouvelle série de Newsletters sur les conditions extrêmes dans le monde industriel, après avoir exploré les environnements sub-zéro, nous allons maintenant nous pencher sur les problématiques des hautes températures pour les matériaux métalliques. Nous réfléchissons à l'impact de ce paramètre sur les caractéristiques mécaniques et sur les réflexes à avoir lorsqu'une atmosphère dite agressive pour le matériau est de la partie. Pour conclure, nous avons décidé de mettre à l'honneur une pièce que l'on retrouve dans l'aéronautique et dans l'énergie : les aubes de turbines. Ce produit si caractéristique des hautes températures nous permettra d'introduire les grandes lignes du fluage. Mais avant tout, il est nécessaire de définir les plages de températures critiques lorsque l'on parle de travail à chaud pour les grandes familles d'alliages métalliques utilisées dans la construction mécanique. On s'aperçoit avec le tableau 1, qui s'appuie principalement sur l'évolution de la limite d'élasticité et de la résistance mécanique à la traction avec la température, que le début du domaine critique varie en fonction de l'alliage.

Tableau 1 : Ordres de grandeur concernant les températures limites basses de ce que l'on nomme travail à chaud.

T°C limite basse	Alliages Aluminium	Aciers Inoxydables	Aciers Réfractaires	Alliages de titane	Superalliages base nickel forgés	Superalliages base cobalt
	100-150°C	< 600°C	< 1000°C	500-550°C	700-900°C	950-1000°C

Il existe également une autre façon de déterminer cette limite basse du travail à chaud, en prenant en compte une température proportionnelle à la température de fusion (T_f) de l'alliage (0,3 voire 0,5 T_f). Ces valeurs, reprises dans le tableau 2, correspondent à l'activation des mécanismes dits de fluage, phénomène qui sera abordé dans cet article.

Tableau 2 : Température limite basse en prenant en compte les risques de fluage.

	Aciers de construction	Alliages d'aluminium	Alliages de titane	Superall. base Ni classiques
Température de fusion (T_f)	1500 - 1400 °C	< 660°C	< 1660 °C	1450 - 1300 °C
0,3 T_f	450 – 420°C	< 198°C	< 498°C	435 – 390°C
0,5 T_f	750 – 700°C	< 330°C	< 830°C	725 – 650°C

Au-delà de 1000°C, il sera nécessaire d'utiliser des céramiques ou des superalliages élaborés à l'aide de procédés de fonderie particuliers qui permettront d'obtenir des tailles et des morphologies de grains très particulières.

On pourrait également définir le domaine des températures à risque en fonction de degré de réactivité des alliages lorsqu'ils se trouvent dans un milieu oxydant ou réducteur, voire carburant ou nitrurant. On s'aperçoit donc que le domaine du travail dit « à chaud », qui dépend de l'alliage, est également fortement impacté par les conditions de fonctionnement du produit en question. Ces



«Gestion des risques industriels »

NEWS 53 - MAI 2021

différents critères pour définir les zones de travail critique vont nous permettre d'introduire successivement 3 problèmes majeurs des hautes températures : l'abaissement des caractéristiques mécaniques, les problèmes de réactivité de surface avec l'oxydation à chaud et le fluage.

I. Caractéristiques mécaniques et hautes températures.

D'une façon générale, la résistance mécanique à la rupture (R_m), la limite d'élasticité et la dureté des matériaux métalliques décroissent avec l'élévation de la température, comme le montre de façon schématique la figure 1 avec l'évolution de la résistance spécifique ($R_m / \text{densité}$).

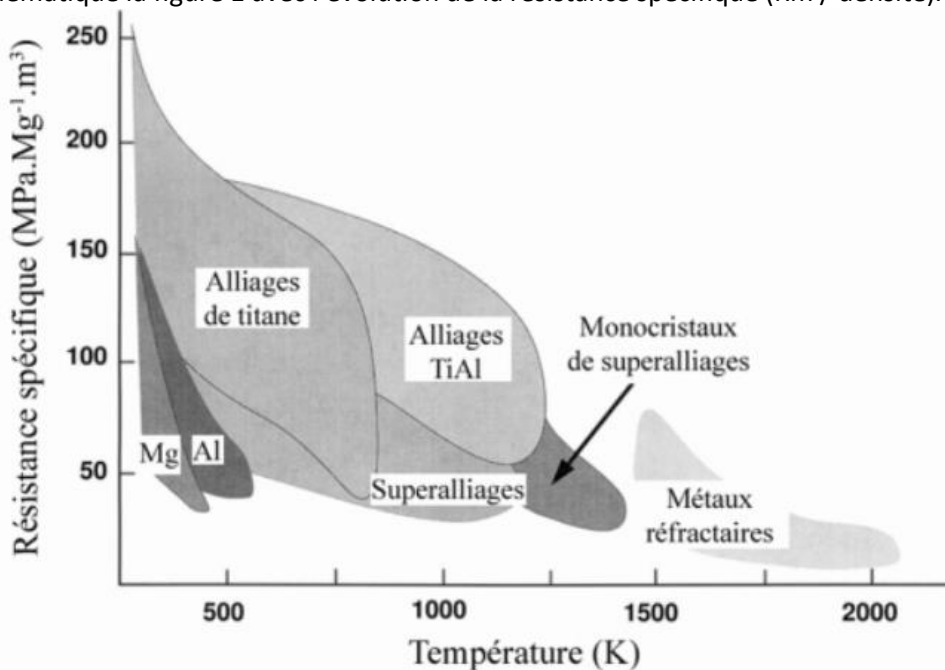


Figure 1 : Evolution de la résistance spécifique en fonction de la température. [LAMI 04]

Il arrive dans certains cas de pouvoir bénéficier d'une augmentation de la dureté avec une élévation modérée de la température (Cf. figure 2). On rencontre ce phénomène pour beaucoup d'aciers outils, dans ce cas on parle de durcissement secondaire et pour des superalliages base nickel, certains aciers inoxydables (les PH), certains alliages cuivreux (Cu-Ni, Cu-Be, ...) ou, à des températures moindres pour les alliages d'aluminium (2000, 6000, 7000), on parle alors de durcissement structural.



«Gestion des risques industriels »

NEWS 53 - MAI 2021

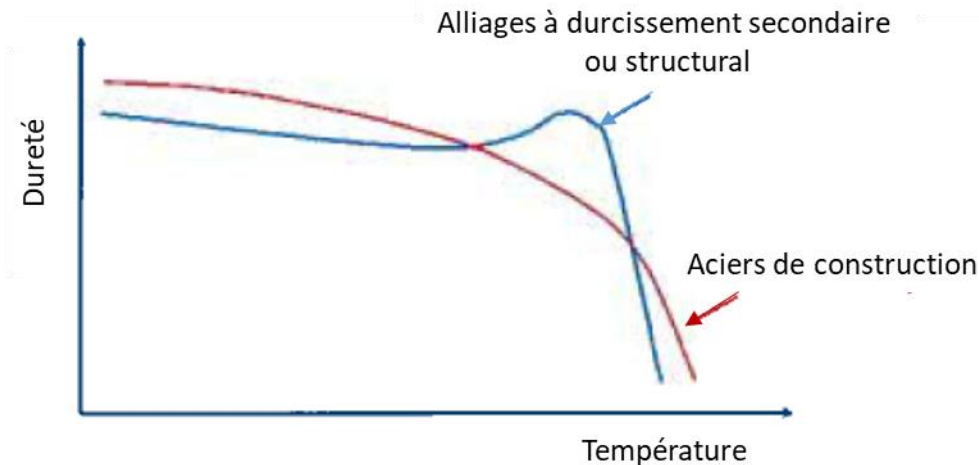


Figure 2 : Mise en évidence du durcissement secondaire ou structural selon les alliages.

Ce phénomène de durcissement est associé à la précipitation d'une ou plusieurs phases qui seront cohérentes ou semi-cohérentes avec la matrice. Ces précipités peuvent être des carbures, des nitrides, carbonitrides, voire des composés intermétalliques [$\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al})$ (γ'), Ni_3Nb (γ''), phase « Geometrically Close-Packed » (G.P.C.), ...] L'ensemble des traitements thermiques des alliages préalablement cités repose sur ce phénomène qui est activé pendant l'opération de revenu (ou de maturation pour les alliages d'aluminium) et que l'on pratique après une trempe ou une hypertrempe.

Certains traitements thermochimiques utilisés sur des aciers de construction ont pour objectif de former des nitrides, soit pendant le traitement lui-même (la nitruration et traitements dérivés), soit après un revenu effectué après des carbonitrurations sur-enrichies à l'azote du type CARBO HN (High Nitrogen) [FLEU 19 ; WINT 17]. Dans ces deux cas, on n'observe peu ou pas d'adoucissement jusqu'à ce que la température entraîne une coalescence et une perte de cohérence avec la matrice des précipités formés.

Il est important de spécifier que tous les précipités ne sont pas favorables en vue d'une utilisation à hautes températures. En effet, il est possible de former pour des superalliages base nickel et certains aciers réfractaires, des constituants durs et fragiles appelées phases T.P.C. (Topologically Closed-Packed) : phase σ (ex : $\text{Cr}_{23}\text{Fe}_{23}\text{Ni}_4$ pour un acier inoxydable austénitique 25-20 chauffé entre 600°C et 1150°C), phase μ et phase de Laves η (ex : Fe_2Mo , Fe_2Nb , Fe_2Ti) qui apparaissent généralement après plusieurs heures de service à hautes températures. Les phases T.P.C. sont constituées de couches atomiques denses séparées par des distances interatomiques relativement larges, contrairement aux plans denses rapprochés dans les 3 directions de l'espace des phases G.P.C.

Ces précipités sont donc doublement indésirables pour le bon fonctionnement d'un produit à haute température à cause de leur fragilité en cisaillement et également puisqu'ils piègent les éléments d'addition qui devraient former des précipités cohérents avec la matrice, dans le cas d'une formation en cours d'élaboration.



«Gestion des risques industriels »

NEWS 53 - MAI 2021

BIBLIOGRAPHIE

- [FLEU 19] A. Fleurentin, « Précipitation au revenu après carbonituration profondes sur-enrichies à l'azote », Technique de l'Ingénieur N°RE 280, 2019.
- [LAMI 04] M. Lamirand, « Influence de l'oxygène, de l'azote et du carbone sur la microstructure et la ductilité des alliages TiAl », thèse soutenue en janvier 2004.
- [WINT 17] KM. Winter, J. Baumann, A. Fleurentin, « High Nitrogen Carbonitriding », Industrial Heating, mars 2017.