

ECHAUFFEMENT ET EVOLUTION STRUCTURALE D'UN ACIER XC 42 LORS D'UN ESSAI DE TORSION A 700 °C

Reçu le 04/09/2000 – Accepté le 16/10/2001

Résumé

Ce travail a pour but de montrer qu'il est possible d'apprécier la température et de développer un modèle simple de calcul de la recrudescence de la température en cours de déformation pour un acier XC 42 à une température d'essai de 700°C et pour deux vitesses de déformation généralisées différentes de 5s⁻¹ et 30s⁻¹.

Cette étude prend en considération, d'une part l'enthalpie du changement de phase $\alpha \rightarrow \gamma$ qui se libère au cours de la déformation dans l'intervalle de température A₁-A₃, et d'autre part, des mécanismes thermiquement activés (restauration et recristallisation dynamique) mis en jeu lors de la déformation du matériau.

Comme nos essais étaient pratiqués à la température de 700°C, proche de celle du point de transformation A₁, les structures obtenues après trempe rapide montrent bien que pendant la déformation le matériau a subi la transformation de phase $\alpha \rightarrow \gamma$, provoquée par l'auto échauffement de l'acier XC42. Le degré d'austénitisation est donc fonction de l'auto échauffement du matériau qui, à grande vitesse de déformation (227°C), est plus important qu'à faible vitesse (142°C).

Mots clés: Auto échauffement, microstructure, acier, essai de torsion, déformation.

Abstract

This work has as a goal to show that it possible to appraise the temperature during the deformation for the steel XC 42 at the test temperature of 700°C and to different generalized deformation velocities of 5s⁻¹ and 30s⁻¹.

This study into account in a one hand the enthalpy transition change $\alpha \rightarrow \gamma$ liberated during the deformation process in the temperature initial A₁-A₃ and in the other hand the activated thermal mechanisms (dynamical restoration and recrystallisation) taking place during the material deformation.

As our test were done at the temperature of 700°C, close to that of the transformation point A₁, the obtained structures after a fast soak show that during the deformation, the material was undergone to the transformation phase $\alpha \rightarrow \gamma$ generated by the self-heating of the steel XC 42. The degree of the austenitisation is a function of self-heating of the material which is higher in large values of the deformation velocity (227°C) than the lower ones (142°C).

Keys words: Self-heating, micro structural, steel, torsion test, deformation.

R. BENSABA

Département de Physique
Faculté des Sciences
Université Mentouri
Constantine, Algérie

ملخص

التسخين هذا العمل هو الكشف عن إمكانية معاينة الحرارة، وتطوير نموذج بسيط لحساب تراجع الحرارة في طور التحول بالنسبة للفولاذ XC42 في حرارة تجريبية تبلغ 700°م وبسرعتي تحول مختلفتين تبلغان 5s⁻¹ و 30s⁻¹. وهذه الدراسة تأخذ في الاعتبار، من جهة تحول الطاقة الحرارية في مرحلة $\alpha \rightarrow \gamma$ والتي تتحرر في أثناء الانسحاق ما بين درجتي الحرارة A₁-A₃. ومن جهة أخرى، تأخذ في الاعتبار الميكانيزمات الحرارية النشطة المستخدمة أثناء انسحاق المعدن.

وبما أن تجاربنا طبقت في درجة حرارة تبلغ 700°م، وهي قريبة من نقطة التحول A₁، فإن البنيات الناتجة بعد التبريد السريع تبين أنه أثناء الانسحاق، تلقى المعدن تحولات من مرحلة $\alpha \rightarrow \gamma$ ؛ □ والناتجة عن التسخين الذاتي للفولاذ XC42. فدرجة التحول من مرحلة لأخرى متوقفة على التسخين الذاتي للفولاذ والتي تكون أكبر في حالة الانسحاق السريع (227°م)، منها في حالة السرعة الضعيفة (142°م).

الكلمات المفتاحية: التسخين الذاتي، بنيات جزئية، فولاد، تجارب التمدد، تحول.

La variation du couple de torsion, en fonction de la température en cours de déformation, présente un intérêt particulier, dans la mesure ou elle permet de situer les domaines de déformation à chaud et à tiède. De plus, la température de déformation détermine en partie la structure et les propriétés d'emploi de l'acier XC 42.

Le chauffage, la vitesse de chauffage et la déformation régissent les phénomènes thermiquement activés et la transformation de phase $\alpha \rightarrow \gamma$, qui eux-mêmes, dictent les principaux paramètres micro structuraux de l'état traité.

L'un des intérêts de la déformation à 700°C est d'engendrer des transformations de phases rapides conduisant à des microstructures de meilleures caractéristiques. Les microstructures obtenues après déformation dépendent essentiellement de:

* la conversion de l'énergie mécanique en enthalpie d'évolution structurale.

* la cinétique de dissolution des carbures.

* l'effet de la vitesse de déformation [1, 2] sur les points de transformation (A₁-A₃) et des pertes par convection et conduction.

Lorsqu'un acier hypo-eutectoïde est en cours de déformation dans le domaine (A₁-A₃), la détermination des propriétés thermiques et mécaniques dans la zone de transformation est très délicate. Il s'agit essentiellement de la capacité thermique en masse et des enthalpies de changement de phases.

Cette étude prend en considération l'auto échauffement du matériau en cours de déformation. L'augmentation de la température en cours de déformation est d'autant plus importante que la vitesse de déformation est

grande. C'est pourquoi, l'auto-échauffement contribue à activer la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ ainsi que les processus d'adoucissement (recristallisation et restauration dynamique), permettant d'augmenter la capacité de déformation du matériau [3, 4].

Il est à noter que cette température (700°C) de déformation met en jeu des mécanismes différents, entraînant l'évolution de la structure du matériau. En effet, l'augmentation de la température de déformation en cours de l'essai de torsion à 700°C active les processus d'adoucissement et provoque la mise en solution rapide des carbures. Ces phénomènes conduisent à une augmentation de la fraction volumique d'austénite au dépend de celle de la ferrite.

L'accroissement de la température en cours de déformation permet l'aptitude au glissement dévié des dislocations, ce qui entraîne la diminution du couple de torsion et de la consolidation du matériau. Cette diminution du couple de torsion n'empêche pas les processus d'évolution structurale (changement de phases, recristallisation et restauration dynamique) [5,6] de la taille, de la morphologie et de la répartition de la phase carbure. En général, lorsque la température augmente, la consolidation du métal diminue.

PLAN D'EXPERIENCES

Les essais de torsion ont été effectués sur un acier XC42 dont la composition chimique est donnée dans le tableau 1.

C	Mn	Si	P	Ni	Cr	Mo	S	Cu	Al
0.42	0.72	0.23	0.023	0.03	0.15	0.01	0.031	0.03	0.045

Tableau 1: Composition de l'acier XC42 étudié.

Après étirage, cette nuance a subi une normalisation (Fig.1), qui comprend une austénitisation à 825°C sous atmosphère contrôlée pendant 45 mn, suivie d'un refroidissement à l'air.

Les valeurs des points de transformation statique Ac1 et Ac3 de l'acier au chauffage sont respectivement égales à 740°C et 790°C.

En général, les essais ont été menés jusqu'à la rupture des éprouvettes, puis elles ont été trempées juste après rupture pour figer la structure.

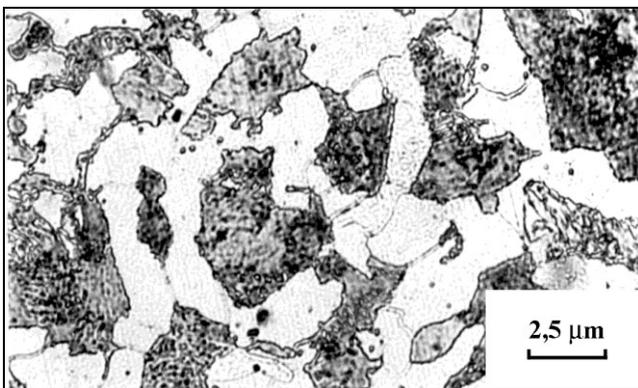


Figure 1: Structure ferrito-perlitique; état initial après normalisation.

Déroulement de l'essai

L'éprouvette (Fig.2), fixée entre les barres de torsion, est placée avec précision suivant l'axe de révolution de l'inducteur qui permet de lui appliquer une loi de température-temps prédéterminée. La température de l'essai est contrôlée par un thermocouple chromel-alumel soudé par point à la surface de l'échantillon.

R (mm)	L (mm)	N (tr/mn)	$\bar{\epsilon}$ (s ⁻¹)
3	13.6	375	5
3	9	1500	30

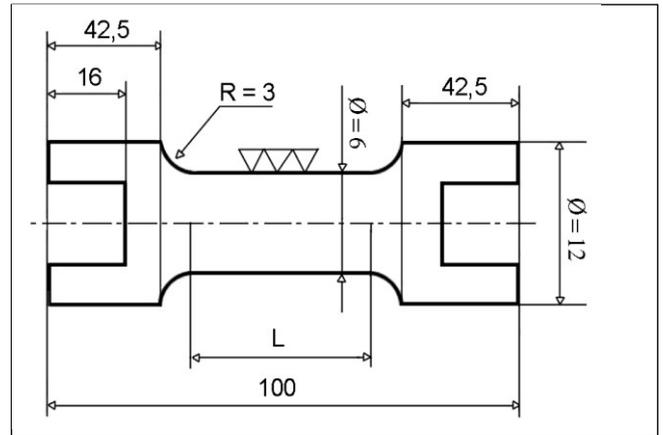


Figure 2: Géométrie de l'éprouvette et conditions d'essai.

La lecture de la température est assurée par un programme qui a pour fonction d'assurer aussi la chauffe, puis la régulation de la température de l'éprouvette. Ce programme est en fait un régulateur numérique du type P.I.D. (Proportionnel Intégrateur Dérivée).

Lors de nos essais, les éprouvettes ont été chauffées avec une vitesse de 105°C/s (Fig.3) jusqu'à 700°C. La température de l'essai étant atteinte, l'éprouvette est maintenue 120 secondes à cette température avant l'essai de torsion. Il est à remarquer que nos essais de torsion ont été pratiqués sous atmosphère contrôlée (vide plus argon).

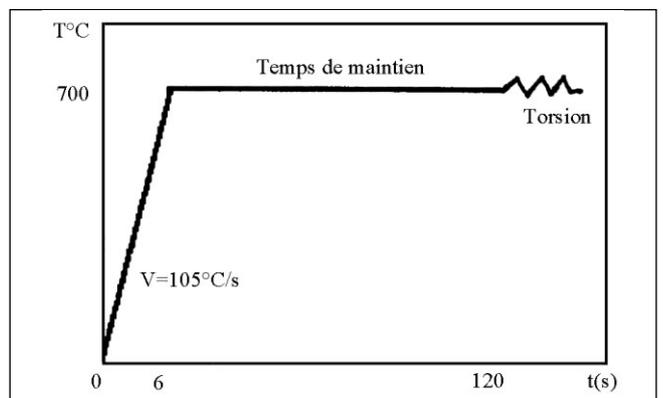


Figure 3: Schéma du cycle de chauffage.

ANALYSE DES COURBES EXPERIMENTALES

En général, après avoir atteint une valeur Γ_m , pour un nombre de tours Nm, le couple (Γ) décroît de façon

continue en fonction du nombre de tours jusqu'à la rupture. Le nombre de tours Nm croît lorsque la vitesse de déformation augmente ou lorsque la température augmente.

Lors de notre étude, nous avons mesuré l'élévation de température en cours de déformation pour un état normalisé XC42 à une température d'essai de 700°C et pour deux vitesses de déformation généralisées différentes 5 et 30 s⁻¹. Nous avons sélectionné deux éprouvettes déformées à la vitesse de déformation de 30 s⁻¹; l'une, trempé après rupture et l'autre, après interruption de l'essai à une déformation (3 tours) inférieure à celle de rupture (25 tours). L'essai interrompu correspond à la fin de la décroissance du couple. Les échantillons ont été observés par microscopie électronique à transmission pour suivre l'évolution de la structure de façon à déterminer l'influence de l'échauffement adiabatique sur le taux de transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ et sur les processus d'adoucissement (restauration et recristallisation dynamique).

Les figures 4 et 5 montrent l'accroissement de la température en cours de déformation. Nous observons, dans le cas de la basse vitesse de déformation 5 s⁻¹ (Fig.4), une augmentation de la température de l'ordre de 10°C pour une déformation égale à 6, correspondant à la fin de la décroissance brusque du couple. Cette élévation de température étant faible, la diminution du couple est donc consécutive uniquement à l'évolution de la structure du matériau, alors que pour les grandes déformations, elle est attribuée à la fois à la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ et à l'auto-échauffement du matériau qui conduit dans ce cas une élévation de température en fin de déformation de 142°C. Nous obtenons alors, après trempé, une structure martensitique contenant des carbures non dissous (Fig. 6).

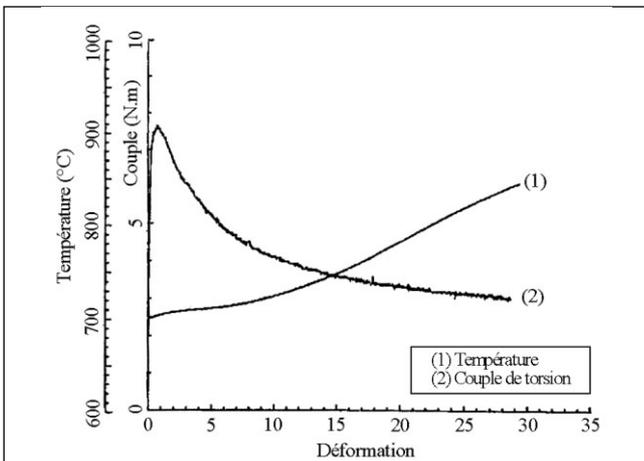


Figure 4: Accroissement expérimental de la température au cours de la déformation pour $\dot{\epsilon} = 5 \text{ s}^{-1}$.

En ce qui concerne la grande vitesse de déformation 30 s⁻¹, l'élévation de la température (Fig. 5) est de l'ordre de 35°C pour une déformation égale à 4, correspondant à la fin de la phase de forte décroissance du couple. Cet effet de décroissance est dû à l'auto-échauffement du matériau favorisant les mécanismes thermiquement activés. Ces derniers sont plus importants aux grandes vitesses qu'aux basses vitesses de déformation. Dans le cas des grandes déformations, en plus de ces mécanismes, il faut tenir

compte de la contribution de la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ qui conduit à des capacités de déformation élevées. Après déformation à rupture et trempé à une vitesse de déformation de 30 s⁻¹, nous obtenons une structure totalement martensitique (Fig. 7). Le degré d'austénitisation est donc fonction de l'auto-échauffement du matériau qui, à grande vitesse de déformation (227°C), est plus élevé qu'à faible vitesse (142°C).

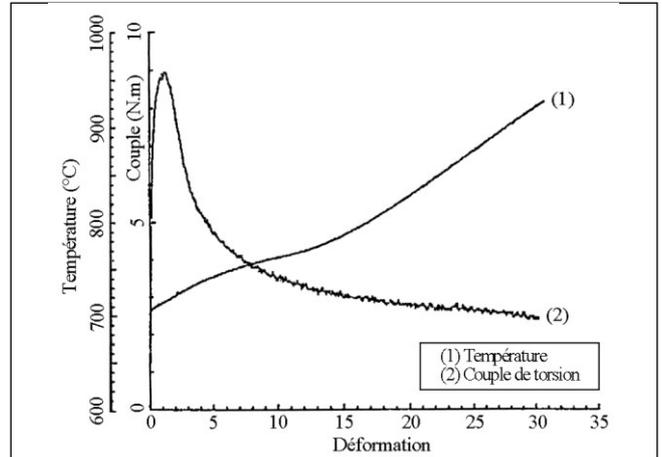


Figure 5: Accroissement expérimental de la température au cours de la déformation pour $\dot{\epsilon} = 30 \text{ s}^{-1}$.

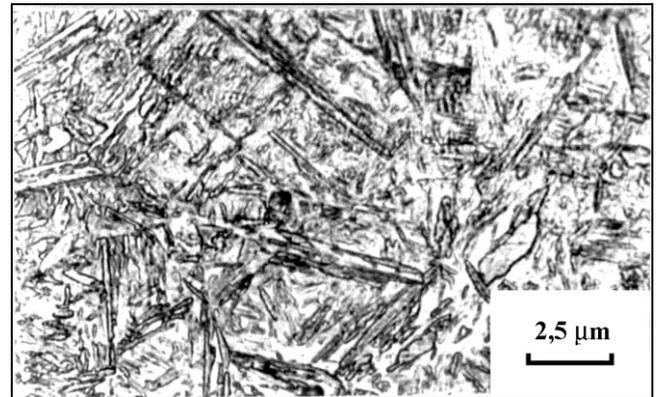


Figure 6: Structure martensitique (contenant des carbures non dissous) résultant d'une trempé après essai à 700°C et $\dot{\epsilon} = 5 \text{ s}^{-1}$.

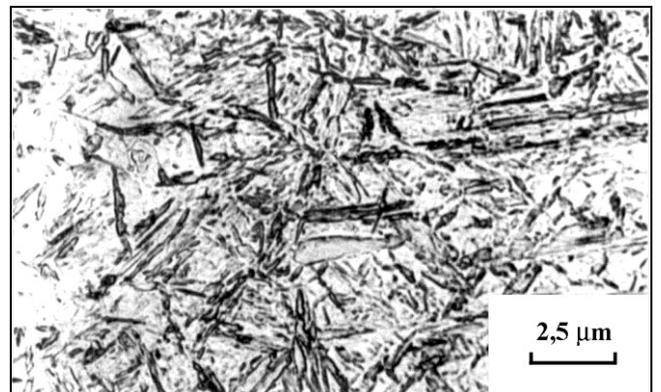
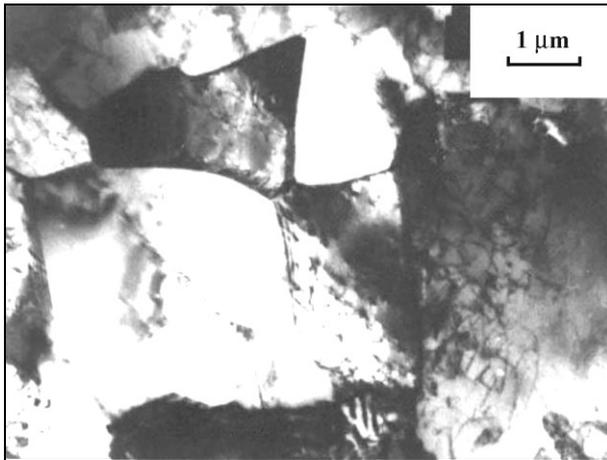
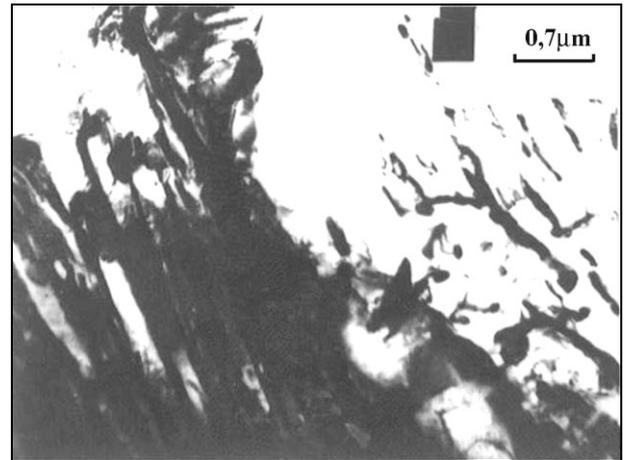


Figure 7: Structure martensitique résultant d'une trempé après essai à 700°C et $\dot{\epsilon} = 30 \text{ s}^{-1}$.

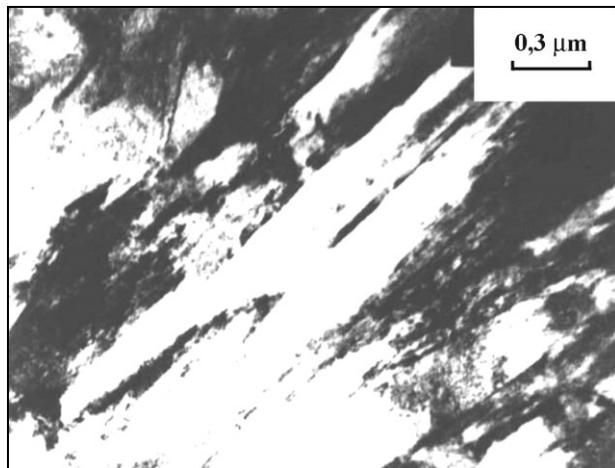


(a) Ferrite

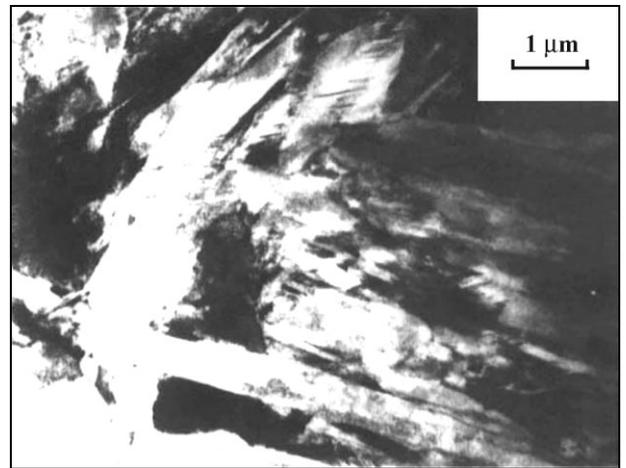


(b) Perlite lamellaire

Figure 8: Structure de déformation (pour une déformation $\bar{\epsilon} = 3$ et $\bar{\dot{\epsilon}} = 30 \text{ s}^{-1}$) à 700°C , après essai interrompu.



(a) Martensite sans macles



(b) Martensite avec macles

Figure 9: Structure de déformation (pour une déformation $\bar{\epsilon} = 30$ et $\bar{\dot{\epsilon}} = 30 \text{ s}^{-1}$) à 700°C , après rupture.

Le but des observations en microscopie électronique à transmission était la mise en évidence des transformations de phases et des processus d'adoucissement induits à la fois par la déformation et l'élévation de température qu'elle entraîne. La micrographie de la figure 8 met en évidence la restauration dynamique de la phase α (Fig. 8a) et la mise en solution partielle des lamelles de perlite (Fig. 8b) dues à la fois à la déformation et à l'auto échauffement du matériau de l'ordre de 35°C dans le cas de l'essai interrompu. Tandis que pour le cas de l'échantillon trempé après rupture (Fig. 9), nous observons une structure complètement martensitique (Fig. 9a) parfois maclée (Fig. 9b). Comme notre essai était pratiqué à la température de 700°C , les structures obtenues après trempe rapide montrent bien qu'au cours de la déformation le matériau a subi une transformation $\alpha \rightarrow \gamma$, induite par l'élévation de la température en cours de déformation. Plus la déformation est grande, plus l'auto échauffement du matériau est important (Fig. 4 et 5).

Pendant l'essai de torsion d'une durée de 6 secondes pour la vitesse de déformation 5 s^{-1} et de 1 seconde pour celle de 30 s^{-1} , le matériau est passé d'une température

d'essai de 700°C avant déformation à une température permettant d'obtenir en fin de déformation une austénite contenant encore des carbures non dissous dans le cas de la basse vitesse de déformation. Alors qu'à grande vitesse de déformation, elle ne contient pratiquement plus de carbures. En se référant aux diagrammes TTA d'Orlich [1], l'élévation de température mesurée lors de nos essais est de 142°C et conduit à une austénite chimiquement hétérogène dans le cas de la basse vitesse de déformation. Par contre, l'élévation de température est de 227°C dans le cas de la grande vitesse de déformation. Nous tenons à préciser que dans nos conditions d'essais, l'application d'un tel diagramme n'est pas rigoureuse étant donnée que celui-ci a été tracé pour un chauffage continu.

CALCUL DE L'ACCROISSEMENT DE TEMPERATURE EN TORSION

Après avoir mesuré la température en cours de déformation (Fig. 2 et 3), nous nous proposerons de déterminer celle-ci en utilisant un modèle simple [7] de bilan thermique.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 U_i \frac{\partial T}{\partial X_i} = f \cdot \sigma_0 \cdot \dot{\bar{\epsilon}} + k \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 T}{\partial X_i^2} - \Delta H \cdot \rho \cdot f_\gamma \cdot \dot{\bar{\epsilon}} \quad (A)$$

Lors des calculs, nous appliquons les hypothèses simplificatrices suivantes:

- Pas de perte par convection et rayonnement.
- Le gradient radial de température est négligé; or la création de chaleur varie de la surface extérieure où elle est maximale, au centre de l'éprouvette où elle est nulle [3].
- Les pertes de chaleur par conduction sont négligées, même pour les faibles vitesses de déformation.
- Les transferts de chaleur par conduction sont négligeables en condition adiabatique [8].

La relation que G.D Lahoti [8] avait appliquée, n'est valable que dans le domaine de température contenant une seule phase. Par contre, dans le domaine intercritique, il faut tenir compte des effets thermiques provoqués par l'évolution de la proportion des phases α et γ . Comme nous l'avons constaté sur les courbes expérimentales (Fig. 2 et 3) obtenues pour un acier XC 42, à une température de 700°C et deux vitesses de déformation 5 s⁻¹ et 30 s⁻¹, la déformation $\alpha \rightarrow \gamma$ joue un rôle prépondérant en cours de déformation. L'absorption de chaleur due à la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ provoque une chute de température. C'est pourquoi, nous avons introduit un terme supplémentaire tenant compte de l'énergie absorbée lors de la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ dans l'expression (B). Dans ces conditions, l'expression (A) devient:

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = f \cdot \sigma_0 \cdot \dot{\bar{\epsilon}} - \Delta H \cdot \rho \cdot f_\gamma \cdot \dot{\bar{\epsilon}} \quad (B)$$

En général, ρ , C_p , f et f_γ dépendent de la température.

Le premier terme de la relation (B) traduit l'accumulation de l'énergie en cours de déformation, tandis que le second est consécutif à la source de chaleur, alors que le troisième terme se rapporte à la chaleur absorbée au cours de la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$.

Or, en torsion, le couple Γ , la contrainte σ_0 , déformation généralisée $\bar{\epsilon}$ et la vitesse de déformation généralisée $\dot{\bar{\epsilon}}$ sont données respectivement par les relations suivantes:

$$\text{Couple maximal: } \Gamma = \frac{2 \cdot \pi \cdot R^3}{3} \cdot \tau$$

$$\text{Contrainte: } \sigma_0 = \sqrt{3} \cdot \tau$$

$$\text{Déformation généralisée: } \bar{\epsilon} = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \cdot N \cdot \frac{R}{L}$$

$$\text{Vitesse de déformation généralisée: } \dot{\bar{\epsilon}} = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \cdot \dot{N} \cdot \frac{R}{L}$$

En remplaçant les expressions ci-dessous par leur valeur respective dans la relation (B) et en considérant que la température le long du rayon est constante, nous aboutissons à l'expression finale suivante:

$$\Delta T = 2 \cdot \frac{f}{\rho \cdot C_p \cdot R^2 \cdot L} \cdot \Gamma \cdot \Delta N - \frac{4\pi}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{f_\gamma \cdot \Delta H \cdot R}{C_p \cdot L} \cdot \Delta N \quad (C)$$

où f_γ est la fraction d'austénite formée ($f_\gamma + f_\alpha = 1$).

Cette expression est particulièrement utile lorsqu'on veut estimer rapidement l'élévation de température obtenue en torsion. Ainsi, pour déterminer la température correspondante à un incrément ΔN , autrement dit, pour un intervalle de temps Δt , il faut connaître la valeur du couple qui est fonction de la vitesse de déformation. Il est clair de noter que le coefficient tenant compte de la dégradation de l'énergie mécanique en chaleur (f), la masse volumique (ρ), la chaleur spécifique (C_p) et la chaleur latente (ΔH) sont fonction de la nature des phases en présence au cours de la déformation.

DESCRIPTION DE LA METHODE DE CALCUL

Pour calculer cet accroissement de température au cours de la déformation, nous avons procédé à partir de deux courbes expérimentales $\Gamma = f(N)$ obtenues à la température d'essai de 700°C, l'une à la vitesse de déformation 5 s⁻¹ et l'autre à la vitesse de déformation 30 s⁻¹.

Dans la première partie de ce calcul, nous avons considéré que toute l'énergie est transformée en chaleur ($f = 100\%$) pour les deux vitesses de déformation considérées (courbes (1), figures 10a et b). Nous avons ensuite introduit un coefficient de dégradation de l'énergie mécanique en chaleur (courbes (2) figures 10a et b). Cela nous permet de corriger les courbes calculées (3) et de déterminer l'évolution du coefficient de dégradation (f) en fonction de la température (Fig. 11).

Les résultats obtenus (Fig. 6) montrent bien que tout le travail de déformation ne contribue pas à un échauffement de la matière, ce qui est en bon accord avec les résultats de la littérature [9]. Une partie du travail est stockée sous

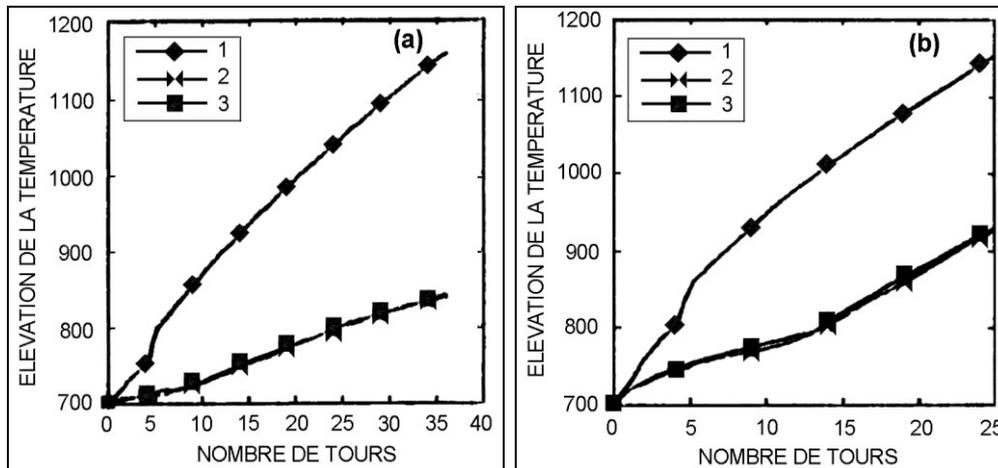


Figure 10: Evolution de la température en cours de déformation, pour deux vitesses de déformation: (a) 5s⁻¹; (b) 30s⁻¹.

Courbe 1: Courbes calculées en tenant compte que toute l'énergie mécanique s'est transformée en chaleur.

Courbe 2: Courbes calculées en tenant compte du coefficient de dégradation de l'énergie mécanique en chaleur.

Courbe 3: Courbes mesurées.

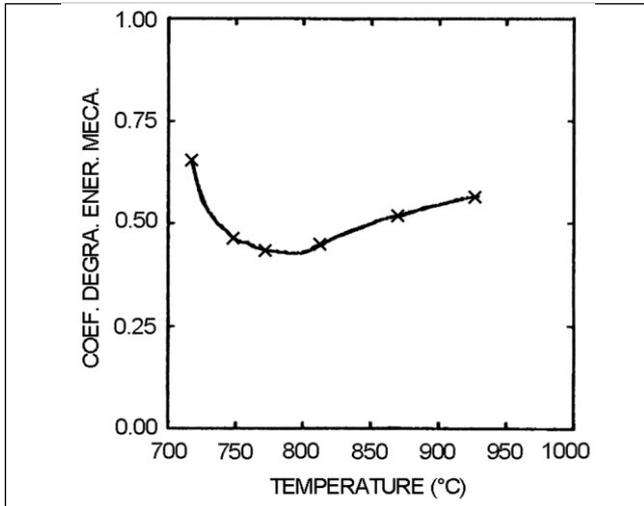


Figure 11: Variation du coefficient de déformation de l'énergie mécanique en chaleur en fonction de la température de l'essai ($\dot{\epsilon} = 30 \text{ s}^{-1}$).

forme de défauts dans le réseau cristallin ou est absorbée par la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ dans le domaine intercritique. D'après la figure 6, nous constatons que le coefficient tenant compte de la dégradation de l'énergie mécanique en chaleur pour un essai pratiqué à la vitesse de déformation 30 s^{-1} et à la température de 700°C évolue en fonction de la température et de la nature des phases en présence au cours de la déformation, contrairement à certains auteurs [8, 9, 10] qui le considèrent constant (0.85-1) en cours de déformation.

CONCLUSION

De nombreux thèmes qui relèvent de la thermique des matériaux n'ont pas été abordés dans cette article. L'étude des transitions solide-solide (transformation $\alpha \rightarrow \gamma$, trempe des matériaux,...) en cours de déformation est un vaste domaine qui a été passé sous silence. La thermique a longtemps été négligée dans les analyses des procédés de mise en forme des métaux. Cette négligence est dû essentiellement aux manques de moyens.

L'objectif de notre travail était de montrer, à partir de cet exemple la possibilité d'apprécier et de calculer l'évolution de la température en cours de déformation. Cette étude nous a permis de mieux comprendre l'influence de l'échauffement adiabatique sur le taux de transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ et sur les processus d'adoucissement qui ont lieu pendant l'essai de torsion (restauration et recristallisation dynamiques). En effet, les basses vitesses de déformation conduisent à de faible accroissement de température

comparée à ceux obtenus aux grandes vitesses de déformation.

Un champ très vaste reste ouvert à la recherche de base avant que des outils fiables de simulation puissent être mis à la disposition des praticiens dans les secteurs industriels concernés. Les modèles doivent être améliorés et éprouvés. Il est également clair que la complexité des phénomènes impose la constitution d'équipes pluridisciplinaires.

NOMENCLATURE

- R : Rayon de l'éprouvette.
 L : Longueur utile de l'éprouvette.
 T : Température.
 t : Temps.
 N : Nombre de tours.
 \dot{N} : Vitesse de rotation.
 ΔN : Variation du nombre de tours.
 ΔT : Variation de la température.
 k : Conductivité thermique.
 U_i : Une source de chaleur interne.
 ρ : Masse volumique.
 C_p : Chaleur spécifique.
 $\frac{\partial T}{\partial t}$: Variation de la température d'une particule dans son mouvement.
 f : Fraction de travail convertie en chaleur.
 σ_0 : Contrainte.
 ΔH : Chaleur latente de transformation $\alpha \rightarrow \gamma$.
 f_γ : Fraction d'austénite formée.

REFERENCES

- [1]- Orlich J., Atlas Fur Warmebehandlung der Stahle band 3.4 Zeit. Temperature. Austenitische-rung schanbilder (1976).
- [2]- Vignes A., 2ème colloque Mécanique et Métallurgie, Tarbes (1974).
- [3]- Bensaha R., Thèse Doctorat d'ingénieur, INPL, Nancy (1987).
- [4]- Lahoti G.D., Altan T., *Eng. Mater. Technol.*, Trans. ASME, 97, (1976), p.24.
- [5]- Bensaha R., Metauer G., *Rev. de Métallurgie*, Mars, (1994), p. 489.
- [6]- Bensaha R., Metauer G., *Rev. de Métallurgie*, Avril, (1994), p. 639.
- [7]- Jeandin M., *Rev. Générale de Thermique*, n°372, Décembre, (1992), p. 713.
- [8]- Lahoti G.D., Altan T., *J. Engi. Mat. and Tech.*, April, (1975), p. 113.
- [9]- Chevrier J. Che., *Rev. Générale de Thermique*, n°366, Juin-juillet, (1992), p. 19.
- [10]-Recht R.F., *J. App. Mech.*, June, (1964), p. 189. □