

Influence de **structure en bandes** sur l'usinabilité des pièces forgées

P.-F. Cardey et A. Fleurentin, pôle matériaux métalliques et surfaces, Cetim, Senlis

Altérations métallographiques de l'acier, les structures en bandes proviennent d'une hétérogénéité de composition à l'échelle microscopique et apparaissent lors de la solidification. Leurs mécanismes d'apparition et de suppression influent sur l'usinabilité des pièces forgées. Explications sur la base d'une étude menée sous la tutelle de la commission Forge AFF/Cetim.

Au travers de cet article, le Cetim souhaite rappeler les mécanismes d'apparition et de suppression de la structure en bande et de ces effets sur l'usinabilité. Il repose sur la première partie d'une étude menée sous la tutelle de la commission Forge AFF/Cetim sur l'usinabilité de pièces forgées à chaud au cours d'opérations de tournage, forage et taillage ^[1].

Qu'est-ce qu'une structure en bandes ?

La structure en bandes est une altération métallographique de l'acier qui se traduit par la présence de bandes perlitiques alternées avec des bandes ferritiques (**figure 1**). Elle est fréquente dans les aciers ayant une

teneur en carbone comprise entre 0,1 et 0,35% ^[2]. Les structures en bandes dans les aciers proviennent d'une hétérogénéité de composition à l'échelle microscopique et apparaissent lors de la solidification. Lors du refroidissement, cette hétérogénéité va aboutir à des ségrégations, c'est-à-dire à des régions plus riches que d'autres en éléments d'alliages.

En effet, certains éléments d'alliages ont une solubilité particulièrement médiocre en phase solide, c'est notamment le cas du phosphore, du manganèse, du nickel et du chrome. Ainsi, lors du refroidissement, les premiers germes à se former (dendrite) vont rejeter ces éléments dans le liquide résiduel environnant (**figure 2**).

La capacité d'un élément d'alliage à diffu-



FIGURE 1 : Microstructure en bandes dans un 27CrMo4.

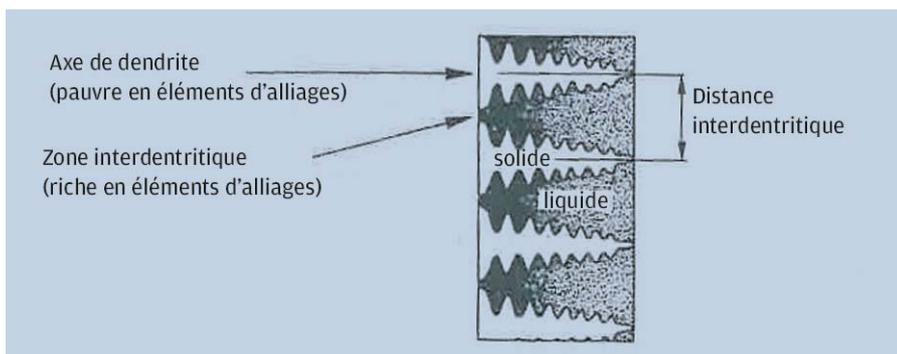


FIGURE 2 : Dendrites dans l'acier en cours de solidification.

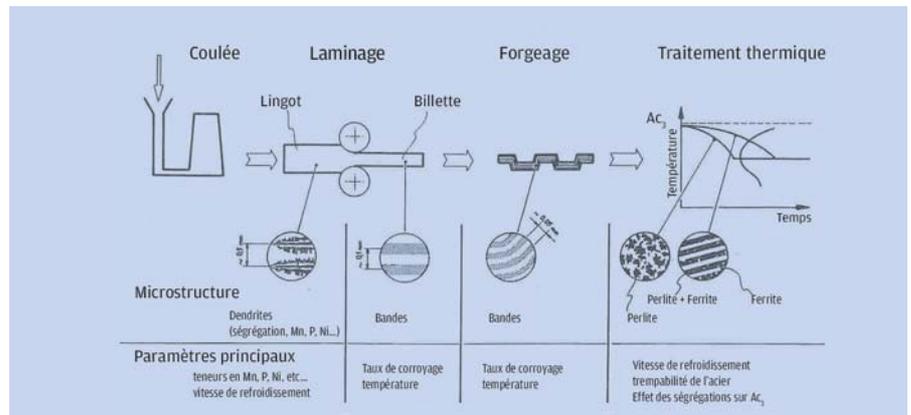


FIGURE 3 : Origine et évolution de la structure en bandes.

ser dans l'acier solide peut, cependant, tendre à faire disparaître la ségrégation. En effet, avant le laminage à chaud, l'acier est maintenu à haute température (1 200 - 1 300 °C). Un effacement de la ségrégation peut donc se produire si l'élément considéré diffuse suffisamment rapidement dans l'acier (c'est le principe du traitement d'homogénéisation).

Dans le cas d'un traitement d'homogénéisation n'ayant pas permis d'éliminer les ségrégations chimiques, l'acier présente principalement une ségrégation de manganèse, de phosphore et de chrome, située à intervalles périodiques imposés par l'espace interdendritique (plusieurs centaines de microns). Lors du laminage et du forgeage à chaud ces distances interdendritiques sont réduites jusqu'à trente fois à cause des opérations de corroyage (figure 3). Cette hétérogénéité de compo-

sition a des répercussions sur les transformations des aciers lors du refroidissement. Or, certains des éléments ségrégés sont alphas, c'est-à-dire qu'ils favorisent la formation de ferrite en élevant la température de transformation de l'austénite γ en ferrite α (Ac_3). C'est le cas du phosphore, de l'arsenic et du molybdène. Le manganèse, le chrome et le nickel ont l'effet inverse, ils sont gammagènes.

Les zones interdendritiques, plus riches en éléments d'alliages, ont donc une température de transformation plus basse que celle des dendrites. De plus, l'effet gammagène du manganèse est prépondérant sur l'effet alphas du phosphore, les zones interdendritiques ont donc souvent leurs températures Ac_3 abaissées. Par conséquent, lors du refroidissement, la ferrite proeutectoïde se forme d'abord aux axes des dendrites en rejetant le carbone qui diffuse des zones appauvries en manganèse (dendrite) vers les zones enrichies (zones interdendritiques). Ce processus est illustré en figure 4 sous la forme d'un diagramme TRC.

On notera que pour limiter l'apparition d'une structure en bandes, les aciers contenant du molybdène sont préférables car ils compensent l'effet du manganèse, tandis que le nickel le renforce.

Influence des traitements thermiques sur la structure en bandes

Déformations et trempabilité des structures bandées

Les traitements thermiques engendrent et révèlent des déformations dans les pièces trempées-revenues (transformation martensitique + relaxation des contraintes induites lors de l'élaboration).

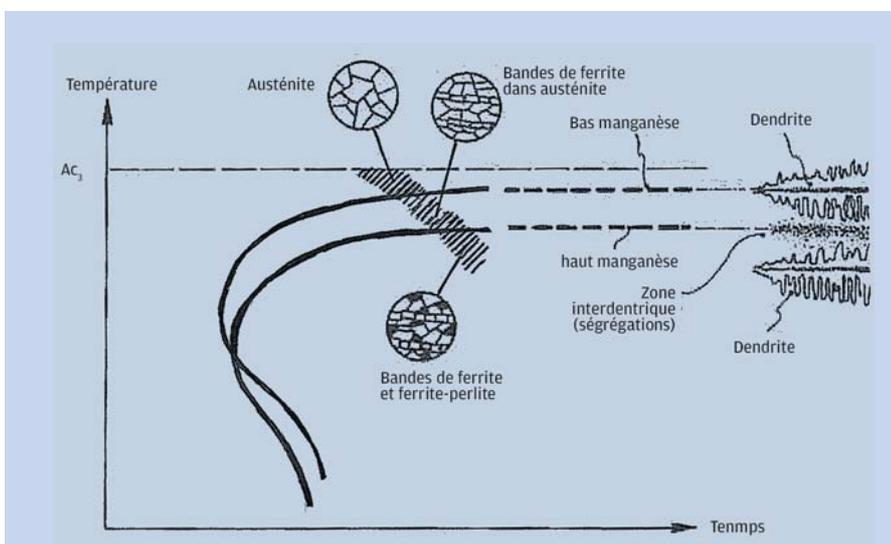


FIGURE 4 : Mécanisme de formation des structures en bandes.

Ces déformations peuvent être, en général, anticipées par :

- la conception, en prenant en compte les futures déformations dans le tracé de la pièce ;
- l'optimisation des moyens de production ;
- le choix matière (aciers à bandes Jominy restreintes).

Les déformations sont donc fonction de la composition de l'acier, de la taille de grains, des dimensions de la pièce, de la température, du milieu de trempe et des moyens de productions. Cependant, malgré les connaissances actuelles dans ce domaine, il existe très peu d'informations publiées sur l'influence spécifique des structures en bandes sur les déformations lors des traitements thermiques.

Il est probable que les aciers présentant des structures en bandes se dilatent de façon anisotrope, à la différence des aciers sans bande [3].

L'article de Roger A. Jaramillo [4] indique une contraction dans le sens parallèle aux bandes et une dilatation dans le sens perpendiculaire lors d'une trempe martensitique.

Diminution ou « suppression » de la structure en bandes

Le recuit d'homogénéisation ou le recuit isotherme, permettent de diminuer, voir « supprimer », la structure en bandes des aciers. Théoriquement, l'élimination de la structure en bandes pourrait s'effectuer par une homogénéisation de la composition chimique de l'acier par diffusion des éléments qui ont ségrégué. En pratique, l'homogénéisation n'est jamais complète. Par exemple pour une largeur de bande de 0,040 mm, il faut un temps de maintien de six heures à 1 200 °C pour éliminer 90 % de la ségrégation initiale. Ce type de recuit n'est pas applicable industriellement et entraînerait une croissance de grains beaucoup trop importante.

La disparition de la structure en bandes dans un acier peut être obtenue en jouant uniquement sur l'élément carbone qui peut facilement être mis en solution de façon homogène dans l'austénite. Il s'agira ensuite d'éviter, lors du refroidissement, une nouvelle migration du carbone qui donnerait, de nouveau, naissance à une structure hétérogène.

Le recuit isotherme est le traitement thermique le plus efficace pour « effacer » la structure en bandes : après austénitisation (mise en solution du carbone), l'acier est refroidi

Coulée	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
1	0,21	0,79	0,31	0,018	0,013	0,88	1,31	0,17
2	0,18	0,84	0,27	0,012	0,015	0,78	1,28	0,17
3	0,20	0,79	0,28	0,011	0,010	0,82	1,23	0,15

TABLEAU 1 : Influence de la composition chimique sur la structure en bande.

rapidement jusqu'à la température du palier isotherme (figure 5) et y est maintenu le temps nécessaire pour la transformation totale de l'austénite.

Note : le recuit isotherme n'est qu'un artifice.

En effet il ne supprime pas la ségrégation des éléments d'alliage (phosphore, manganèse, molybdène, nickel, chrome). Le recuit isotherme ne permet que la mise en solution du carbone. La structure en bandes peut donc réapparaître suite à une austénitisation suivie d'un refroidissement lent.

L'influence des traitements thermiques sur la structure en bandes est très bien illustrée dans l'article italien d'A. Bavaro [5]. L'étude permet de voir l'influence de la composition chimique sur la structure en bande en réalisant trois coulées (tableau 1) sur un 18NiCrMo5 (selon l'ancienne norme italienne ; équivalence EN : 17NiCrMo6-4).

La figure 6 permet de voir l'influence de la composition chimique sur la structure en bandes, ainsi que l'influence de la température d'austénitisation lors du recuit isotherme. En effet, pour chaque coulée, trois recuits isothermes ont été réalisés avec un palier de quatre heures à 640 °C et trois températures d'austénitisation différentes (900, 950, 1 050 °C).

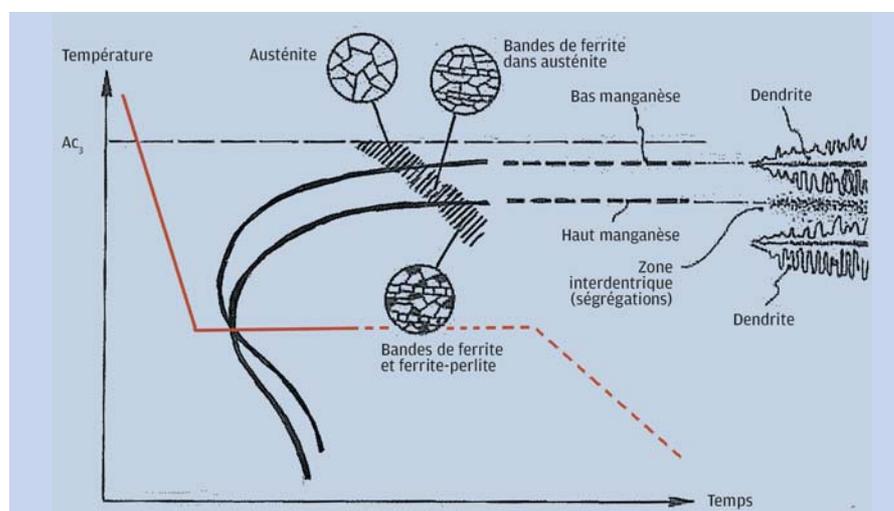


FIGURE 5 : Cycle de recuit isotherme pour « effacer » la structure en bandes.

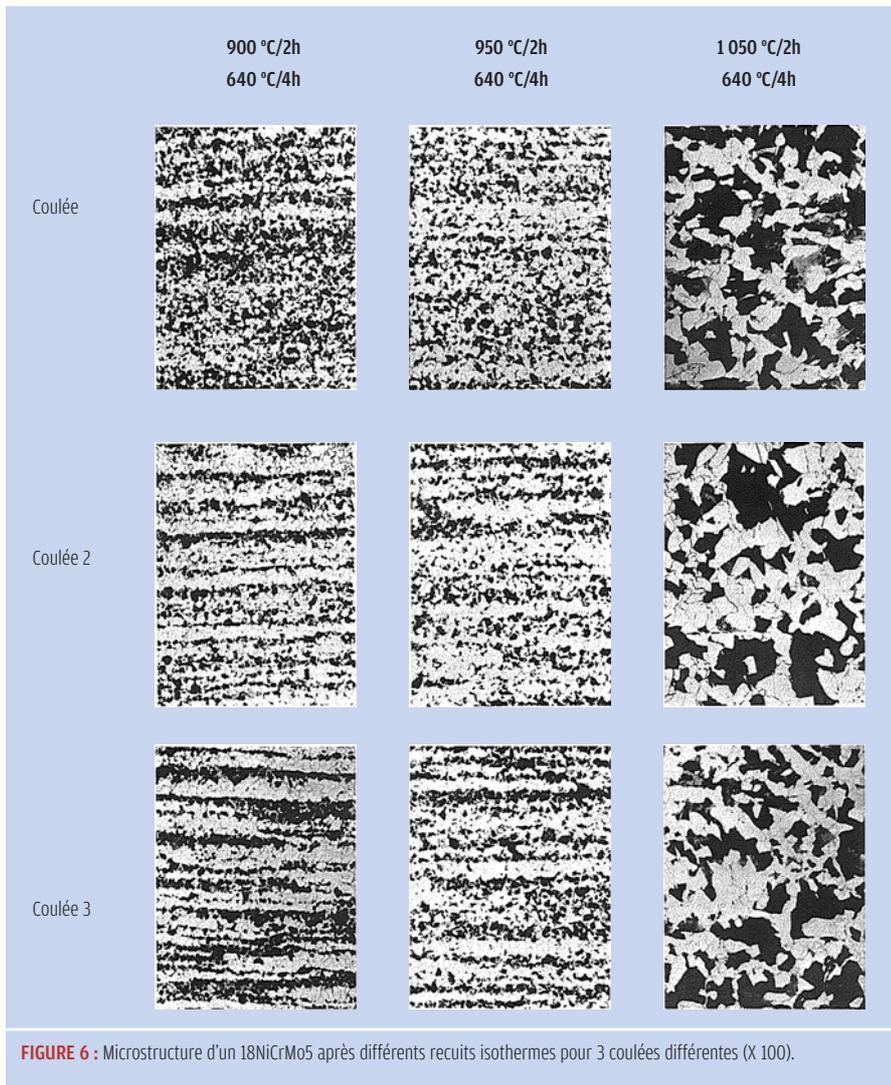


FIGURE 6 : Microstructure d'un 18NiCrMo5 après différents recuits isothermes pour 3 coulées différentes (X 100).

On voit clairement sur ces micrographies l'influence de la composition chimique sur la structure en bandes. En effet, on remarque que l'acier, issu de la coulée n° 3, est fortement bandé. Or, cette coulée est peu enrichie, par rapport aux coulées 1 et 2, en phosphore et molybdène, éléments alpha-gènes, ainsi l'effet gammagène du manganèse est peu compensé et la température Ar3 des zones ségréguées est abaissée, ce

qui favorise la formation de structure en bandes.

La coulée n° 2 est enrichie en manganèse qui est l'élément prépondérant dans la formation de structure en bandes, l'acier, issu de cette coulée, possède également une structure fortement bandée.

Ces micrographies illustrent également l'influence de la température d'austénitisation sur l'élimination de la structure en bande lors du recuit isotherme : lorsque celle-ci est basse (900 °C), le carbone ne se remet pas suffisamment en solution et après le palier du recuit, la structure en bandes est toujours visible. Inversement lorsque l'austénitisation se fait à haute température (1 050 °C), le carbone se remet rapidement en solution homogène et à la fin du recuit, la structure en bandes est « effacée ».

Cependant, une température d'austénitisation trop élevée (1 050 °C) entraîne une forte augmentation de la taille des grains. L'article de M.P. Andrés Sanz [6] traite également de l'influence du recuit isotherme sur la structure en bandes, mais cette fois, en travaillant sur la température du palier isotherme (figure 7).

La différence de composition entre les deux aciers va faire évoluer le diagramme TTT, pour le premier acier (0,31 %C, 0,79 %Cr, 2,89 %Ni), après austénitisation de vingt minutes à 850 °C, le palier se fait à 600 °C en face du nez perlitique, ainsi la structure en bandes est effacée.

En revanche pour le second acier (0,34 %C, 0,75 %Cr, 3,53 %Ni), à 600 °C, le palier du recuit isotherme se fait dans la partie supérieure de la zone perlitique, ainsi les bandes sont encore visibles après recuit isotherme.

M.-P. Andrés Sanz [6] illustre également l'influence de la vitesse de refroidissement sur la structure en bandes.

En effet, sur certains aciers (aciers faiblement alliés), la structure en bandes peut être évitée en jouant uniquement sur la

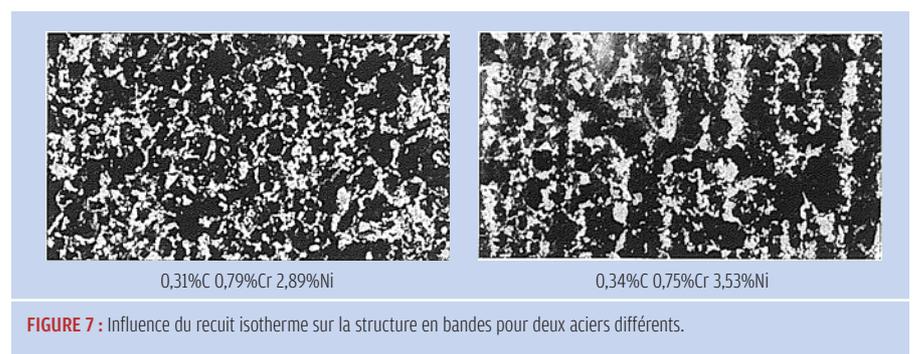
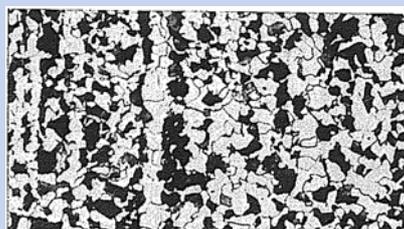


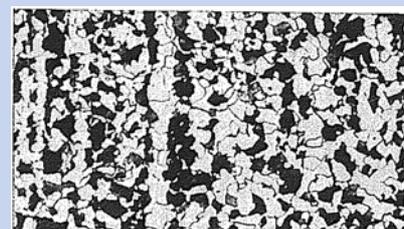
FIGURE 7 : Influence du recuit isotherme sur la structure en bandes pour deux aciers différents.



860 °C/20min, 10 °C/min



860 °C/20min, 30 °C/min



860 °C/20min, 40 °C/min

FIGURE 8 : Influence de la vitesse de refroidissement sur la structure en bandes pour un acier C35E (X100).

vitesse de refroidissement (figure 8) en réduisant le laps de temps entre la transformation ferritique et perlitique.

Caractérisation et classification de la structure en bandes

Norme UNI 8446 [7]

La norme UNI 8446 est un document normatif traitant de la quantification de la structure en bandes. Elle permet de caractériser la structure en bandes suivant deux techniques :

- par « images types » : 7 grades de structures à un grossissement de 50 fois ;
- par « comptage » : nombre de bandes (n) de perlite par millimètre par l'utilisation de la méthode de l'interception linéaire, à un grossissement fois 100. La méthode consiste à superposer sur la micrographie une ligne droite de longueur L perpendiculaire aux bandes et à compter le nombre de bandes perlitiques (N) qui coupent cette ligne droite.

$$n = \frac{N \cdot G}{L}$$

G est l'agrandissement (en l'occurrence 100).

Spécifications PSA, Renault et Ascométal

La spécification Peugeot/Renault 1194, établie en 1969, définit qualitativement la structure en bandes suivant trois images-types au grossissement 250, A : favorable, B : limite favorable et C : défavorable. La spécification Ascométal utilise également des images-types, six images-types au grossissement 100 sont référencées A, A-, B+, B-, C.

ASTM E1268-88

Le document de techniques normalisées ASTM E1268-88 propose des méthodes permettant d'évaluer le degré de « bandage » ou l'orientation d'une microstructure. Elle décrit la méthode de l'intercep-

tion linéaire (voir norme UNI 8446), complétée par une analyse de microdureté permettant de visualiser la magnitude de dureté entre les bandes.

Analyses d'images

Les méthodes décrites ci-dessus par images-types ou comptage sont peu objectives et restent très dépendantes de l'utilisateur. C'est pourquoi, des travaux ont été menés par le CREAS et Renault afin de proposer un « moyen objectif d'évaluation de la structure en bandes dans les produits communs aux aciéristes et aux utilisateurs finaux d'acier » [9].

Cette méthode de quantification de la structure en bandes par analyse d'images permet de qualifier de manière objective la structure et d'en donner une description quantitative, en analysant la dispersion de la largeur et du nombre de bandes dans le produit. Elle utilise le « profil de densité locale » et est basée sur des mesures de teneur, elle permet d'obtenir un spectre représentant l'intensité et la

largeur des bandes (figure 9). Cette méthode a été testée en robustesse et comparée aux images-types d'Ascométal avec une bonne corrélation des résultats.

Influence de la structure en bandes sur l'usinabilité

La littérature concernant la structure en bandes dans les aciers, ses origines et ses influences sur les caractéristiques mécaniques est relativement bien fournie, cependant, il existe peu de texte concernant son influence sur l'usinabilité, même s'il est connu que ce type de structure n'est pas favorable à l'usinage.

De plus, les études ont généralement tendance à considérer d'autres paramètres, tels que les inclusions, comme ayant une influence sur l'usinabilité normalement plus importante que les structures en bandes. L'influence de la structure en bandes sur l'usinabilité dépend tout d'abord du sens d'usinage (figure 10) :

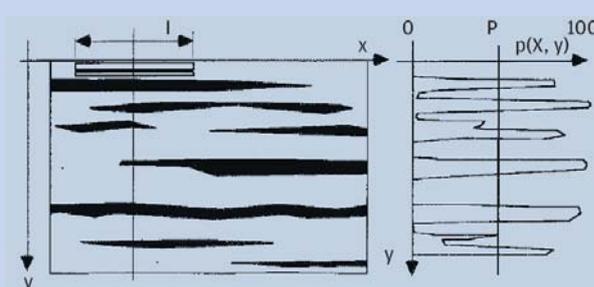


FIGURE 9 : Principe de la mesure de densité locale.

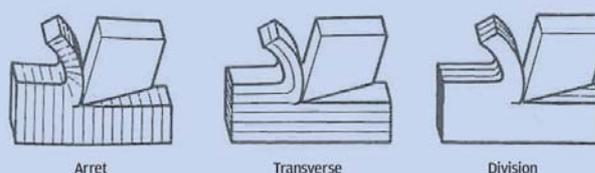


FIGURE 10 : Orientation de la direction d'usinage en fonction des bandes.

En sens « division » ou « arrêt », l'outil de coupe rencontre en permanence un grand nombre de bandes sans réelle influence sur l'état de surface. En revanche, en sens « transverse », l'outil peut travailler un certain temps dans la ferrite (ductile), puis dans la perlite (dure) et des différences d'état de surface peuvent en résulter [3].

La dimension des bandes va également jouer un rôle, en effet des petites bandes (appelées également bandes fragmentées) ont peu d'effet, contrairement aux bandes larges (0,1mm) qui engendrent la formation d'une arête rapportée plus importante [2].

De manière générale, la durée de vie de l'outil et la qualité de l'état de surface vont diminuer avec l'augmentation de l'épaisseur des bandes [10,11].

Plus précisément :

- en tournage et en fraisage l'augmentation de la taille des bandes va avoir un rôle néfaste sur la durée de vie des outils. Des bandes de ferrite larges sont néfastes pour l'état de surface.
- en forage, nous avons observé des diminutions importantes de la durée de vie des outils en présence d'une structure en bandes. Cette usure rapide des outils peut s'expliquer par des variations prononcées du couple et de l'effort de forage. En revanche, on observe peu d'impact sur la forme des copeaux [11].
- en brochage, la taille importante des bandes (épaisseur de 2 à 3 grains soit

près de 0.13mm) entraîne un état de surface dégradé ($R_a > 6,5 \mu\text{m}$). De plus, l'opération de brochage est très sensible aux problèmes de « collage » pour des structures trop malléables comme la ferrite, la présence de bandes larges est donc propice à la casse des outils de brochage.

- la présence de bandes larges semble générer d'avantage de difficulté au niveau des déformations, difficilement prédictibles après traitements thermiques (cas classique : le battement) [11].

Conclusion et perspective

On se rend compte que le traitement thermique effectué, après forgeage à chaud, joue un rôle prépondérant sur l'usinabilité et le respect du dimensionnel des pièces. Un travail approfondi entre l'aciériste, le forgeron et l'usineur ainsi qu'avec le spécialiste du traitement thermique permet d'éviter d'obtenir des structures, telle que la structure en bandes, qui auront tendance à pénaliser la productivité de l'unité de production.

Dans la suite logique des deux précédentes études menées par le Cetim, la commission Forge nous a demandé de travailler sur des pièces forgées à froid et d'étudier l'impact sur l'usinabilité et les déformations des traitements thermiques réalisés chez l'aciériste et après forgeage sur des arbres tournés, forés et taillés.

Bibliographie

[1] A. Fleurentin, P.F. Cardey, Fiches Structures /Usinabilité pour produits laminés ou forgés à chaud, Rapport d'étude n° 012970, Cetim.

[2] F. Convert, F. Lecroisey, A. Pailleux, J.P. Peyre, R. Sechaud, C. Tournier, C.Bournicon, R.Glain, J.L.Griot, J.Mansion, Les aciers et leurs traitements thermiques en construction mécanique, Cetim.

[3] G. Haour, M. Kornmann, Structure en bandes dans les pièces forgées. Batelle, Centre de recherche de Genève, Suisse - Mémoires et études scientifique Revue de Métallurgie - Octobre 1980.

[4] R.A. Jaramillo, M.T. Lusk, M.C. Mataya, Dimensional anisotropy during phase transformations in a chemically banded 5140 steel, Acta Materialia - 2003.

[5] A. Bavaro, E.Di Gianfrancesco, P. Filippi, G.M. Mengoni, Contributo allo studio dell'influenza delle strutture a bande sulle caratteristiche degli acciai da cementazione, La metallurgia italiana - n°2 - 1983.

[6] M.P. De Andres Sanz, Possibilidades de obtener por tratamiento térmico, una estructura libre de bandas, Revista de metalurgia - Vol. 7 - 1971.

[7] Norme UNI 8449, Esame microscopio dei materiali ferrosi. Classificazione della struttura a bande negli acciai da cementazione. Février 1983.

[8] Standard practice ASTM E1268-88, Assessing the degree of banding or orientation of microstructures. Décembre 1988

[9] G. Auclair, M. Lamotte, C. Pichard, Quantification de la structure en bandes dans les aciers ferrito-perlitiques, Revue de métallurgie - Février 1996.

[10] J.N. Dutta, G.S. PAKTI, Influence of banded structure on machinability with particular reference to case hardening steels, 1982.

[11] A. Fleurentin, Recuit isotherme, Rapport d'étude N°030894, Cetim.

[12] Spécifications internes PSA, Renault et Ascométal.