

FRANÇAIS

Formation de bandes de cisaillement du type « laiton » et leur influence sur le changement d'orientation des monocristaux {112}<111> d'alliage Cu-2%Al 797

H. Paul, Z. Jasienski, C. Maurice, A. Piatkowski, J.H. Driver, A. Litwora

Des monocristaux de l'alliage à faible énergie de défaut d'empilement Cu-2%Al, d'orientation initiale {112}<111>, ont été déformés par compression dans un outil de poinçonnement à 77 et 293 K. Les évolutions de microstructure et de microtexture dans les bandes de cisaillement de type « laiton » formées dans ces conditions ont été analysées. Différentes techniques expérimentales ont été utilisées : MEB, MET, microscopie optique, mesures de microtextures par MEB/EBSD et TEM/CBED. Il y a d'abord une rotation des cristaux par glissement, puis une réorientation par maillage mécanique. Lorsque les bandes de cisaillement apparaissent, on observe une augmentation des intensités au voisinage de la texture de Goss {110}<100>, en relation avec une rotation des lamelles de macles à l'intérieur des bandes de cisaillement. À l'échelle du MET, une seconde composante, moins intense, est observée. À l'extérieur des bandes, la rotation des agrégats macle/matrice conduit à une réorientation vers {111}<112>.

Mécanismes de déformation en laminage à froid dans un alliage Ni-Mo-Cr à durcissement structural 807

M. Wróbel, S. Dymek, M. Dollar, M. Blicharski

Les mécanismes de déformation d'un alliage Ni-Mo-Cr à durcissement structural ont été étudiés dans le cas où cet alliage contient une phase ordonnée de gros précipités cohérents. Le mécanisme prépondérant est différent suivant le taux de déformation appliqué : aux faibles déformations c'est le micro-maillage dans les précipités ordonnés et le glissement des dislocations dans la matrice ; aux déformations plus élevées, c'est le maillage dans la phase cfc. Dans la phase ordonnée, la formation de micro-macles dépend de la taille des précipités : dans les précipités les plus gros, elle a lieu pour des déformations relativement faibles. Tous les systèmes de maillage de cette phase peuvent être activés. Dix sur les douze systèmes possibles conduisent à la formation de vraies macles et l'ordre à grande distance est conservé dans les parties maillées. Aux déformations élevées, ce sont surtout des bandes de cisaillement qui se forment et l'ordre à grande distance est détruit.

Étude numérique de la plasticité cristalline : mesure des hétérogénéités dues aux joints de grains pour les déformations faibles 815

F. Barbe, S. Forest, S. Quilici, G. Cailletaud

Un agrégat tridimensionnel de 216 grains a été soumis à une déformation axiale moyenne de 1 %. Les hétérogénéités dans ce polycristal sont dues aux variations de grain à grain de la déformation moyenne de ces grains (effet cristallographique) et à des interactions locales entre grains voisins (hétérogénéités intragranulaires). L'hétérogénéité intragranulaire a été évaluée en fonction de la distance au joint de grain dans un grain déterminé, ainsi que pour l'ensemble des points de la microstructure. Elle se traduit par des

variations locales de comportement liées à l'influence des joints de grains. La distribution des valeurs locales de déformation a été évaluée statistiquement (variance), ainsi que leur incertitude.

Étude par diffraction des rayons X et des neutrons d'échantillons d'aluminium et de cuivre hyperdéformés dans un canal coudé (ECA) puis recristallisés 825

J. Kusnier, T. Baudin, Z. Jasienski, R. Penelle

Le développement des hétérogénéités de déformation dans l'aluminium et le cuivre élaborés par extrusion d'un lingot dans un canal coudé de section constante (Equal-Channel Angular (ECA) extrusion) est discuté à partir des figures de pôles mesurées par diffraction des rayons X et des neutrons ainsi que des fonctions de distribution des orientations cristallines correspondantes. La microstructure et la texture des premiers stades de la recristallisation ont également été caractérisées à différentes échelles par microscopie optique, diffraction des électrons rétrodiffusés (EBSD) dans un microscope à balayage et par microscopie électronique en transmission.

Distribution et localisation de la déformation plastique lors du cintrage de profilés métal-élastomère 835

D. Boscher, M. Gaspérini

La simulation numérique par éléments finis du procédé de cintrage de profilés en alliage d'aluminium recouvert de caoutchouc a été effectuée, afin de prévoir l'apparition de la striction. Une attention particulière a été portée à la description des conditions aux limites, à l'enchaînement des différentes étapes, et à l'analyse de l'érouissage au cours du chargement thermo-mécanique. Les calculs permettent de prévoir qualitativement la zone à risque.

Détermination des contraintes d'origine thermique par la diffraction des rayons X sous incidence rasante 843

A. Baczanski, S.J. Skrzypiek, K. Wierzbowski, Ch. Braham

En utilisant la diffraction de rayons X sous incidence rasante, on a déterminé le champ de contraintes résiduelles dans un revêtement de nitrure de titane (TiN). Les composantes des contraintes résiduelles du premier ordre ont été déterminées dans la couche de TiN sur des substrats de carbure de tungstène (WC) et d'acier. Les constantes élastiques de diffraction calculées avec la méthode auto-cohérente ont été utilisées pour l'interprétation des résultats expérimentaux. Les avantages de la géométrie d'incidence rasante sont démontrés dans le cas d'étude de contraintes résiduelles hétérogènes dans les couches minces.

Évolution de l'énergie stockée en fonction du taux de réduction par laminage pour un alliage de Fe-53%Ni et un acier austéno-ferritique 851

A.L. Etter, M.H. Mathon, T. Baudin, R. Penelle

L'énergie stockée par les grains au cours de la déformation a été estimée par diffraction des neutrons, dans un alliage de Fe-53%Ni et dans un acier austéno-ferritique laminés à froid. Des mesures d'élargissement des pics de diffraction ont permis de mieux comprendre l'influence de l'énergie stockée sur les mécanismes de recristallisation qui mènent à la formation d'une texture cubique accusée dans le cas du Fe-Ni fortement déformé par laminage. Les

résultats montrent que la différence d'énergie stockée entre les principales composantes de la texture de déformation et la composante « cube » augmente avec le taux de réduction et permet ainsi la croissance des grains d'orientation $\{100\}<001>$ au cours de la recristallisation. Cette méthode de détermination de l'énergie stockée a également été utilisée avec succès pour un acier biphasé austéno-ferritique. Les niveaux d'énergie stockée dans chacune des phases sont cohérents avec des observations publiées dans la littérature. En particulier, ces travaux ont montré que l'austénite emmagasine plus d'énergie que la ferrite.

Influence de bandes de cisaillement sur la recristallisation de monocristaux $\{110\}<001>$ de cuivre déformés avec un changement de la direction d'écoulement 859
T. Moskalewicz, M. Wróbel, M. Blicharski, S. Dymek

Des monocristaux de cuivre d'orientation initiale $\{110\}<001>$ ont été déformés par laminage à froid puis par compression plane dans un outil de poinçonnement avec une direction d'écoulement perpendiculaire à la direction du laminage précédent. La texture formée lors de la recristallisation ultérieure a révélé des composantes qui ne sont pas directement reliées à la texture de la matrice déformée. Des bandes de cisaillement se sont formées après le changement de direction d'écoulement. La recristallisation a démarré dans ces bandes et s'est poursuivie par la croissance de grains sélectionnés vers la matrice déformée. Des mesures locales d'orientation ont montré que les phénomènes prévus par la théorie de la croissance orientée ont joué un rôle important dans la formation de la texture de recristallisation. L'orientation des grains dont la croissance est la plus rapide pourrait être le résultat de la formation de macles de recristallisation.

Influence des bandes de cisaillement sur la formation des composantes de texture « de Goss » et « du laiton » dans des monocristaux d'argent d'orientation $\{112\}<111>$ 871
H. Paul, J.H. Driver

Des bandes de cisaillement de type « laiton » se développent dans des cristaux maclés d'argent, d'orientation C- $\{112\}<111>$, déformés en compression plane. Les composantes de la microtexture de ces bandes ont été caractérisées par MEB/EBSD. La matrice maclée se réoriente suivant trois phénomènes : 1) une rotation générale du réseau de la matrice maclée vers l'orientation $\{111\}<112>$; 2) une rotation du réseau cristallin à l'intérieur des bandes de cisaillement, autour de la direction transverse, vers l'orientation $\{110\}<001>$, ce qui favorise l'activation de deux systèmes de glissement coplanaires fortement sollicités, du type $\{111\}<101>$; 3) la formation de composantes de texture proches de celle du laiton-S, $\{123\}<634>$ – $\{011\}<112>$, par glissement hors d'équilibre dans les bandes de cisaillement. Dans les matériaux à faible énergie de défaut d'empilement, la forte intensité de ces composantes résulte de l'envahissement complet de la microstructure par les bandes de cisaillement.

Mécanismes d'évolution de la microstructure et de la texture des tôles d'acier ferritique pendant la recristallisation 883
H. Réglé

L'évolution des microstructures et des textures pendant la recristallisation des aciers destinés à l'industrie automobile est présentée et les mécanismes mis en jeu sont discutés en relation avec les sous-structures de déformation qui se sont formées pendant l'étape précédente de laminage. On montre que les germes ne se développent quasiment que dans les grains de la fibre gamma, dont les cellules de déformation sont plus petites et les désorientations locales plus élevées que dans les grains de la fibre alpha. Leur

développement est analysé par analogie au grossissement anormal, que l'on observe parfois après la recristallisation. Le paragraphe final est consacré à l'importance du contrôle de la recristallisation dans ces aciers vis à vis des propriétés d'anisotropie planaire et aux chutes de propriétés mécaniques induites par les sous-recristallisations.

Techniques à haute résolution pour la détermination des orientations cristallines lors de l'étude des phénomènes de germination pendant la recristallisation des métaux fortement déformés 891
S. Zaefferer

Cet article décrit et évalue différentes techniques modernes de microscopie électronique permettant des mesures à haute résolution des orientations cristallines ; en particulier, la diffraction des électrons rétrodiffusés en microscopie à balayage (EBSD), la diffraction ponctuelle, les diagrammes de Kikuchi et la technique DFCS (Dark Field imaging by Conical Scanning) en microscopie électronique à transmission. Ces techniques sont comparées du point de vue de leur aptitude à permettre d'étudier les phénomènes de germination pendant la recristallisation des métaux fortement déformés. Ces études nécessitent des mesures d'orientations de grande qualité, des résolutions spatiales et angulaires élevées, ainsi qu'une absence de sensibilité aux défauts de réseau.

Étude des mécanismes de recristallisation dans les alliages de cuivre 903
Ph. Gerber, J. Tarasiuk, Th. Chauveau, R. Chiron, B. Bacroix

Des mesures de textures et d'orientations locales ont été réalisées sur des alliages de cuivre après des séquences de laminage à froid-recuit. Elles ont montré qu'en dessous d'un seuil de déformation donné, une texture mixte « déformation-recristallisation » est obtenue après recristallisation statique primaire ; l'orientation $\{100\}<001>$ est renforcée au cours du recuit mais ne domine pas la microstructure finale. Des mesures globales de textures par diffraction des rayons X couplées à des mesures locales d'orientations par EBSD (Electron Back-Scattered Diffraction) dans des matériaux laminés à 70 et 90 % démontrent que l'évolution des orientations au tout début du processus de recristallisation (c'est-à-dire lors de l'étape de germination) est cruciale et détermine la texture de recristallisation.

ENGLISH

Formation of brass-type shear bands and their influence on orientation changes of Cu-2%Al alloy $\{112\}<111>$ single crystals 797
H. Paul, Z. Jasiński, C. Maurice, A. Piatkowski, J.H. Driver, A. Litwora

Single crystals of the low stacking fault energy Cu-2%Al alloy, with initial orientation $\{112\}<111>$, have been deformed by compression in a channel die at 77 and 293 K. Microstructural and microtextural aspects of the formed brass-type shear bands were analyzed. Experimental techniques included TEM, SEM, optical microscopy together with SEM/EBSD and TEM/CBED microtexture measurements. The crystals first rotate by slip, then transform their orientation by deformation twinning. As shear banding starts, a strong increase of intensities near the Goss $\{110\}<100>$ position is observed, and this process is connected with the rotation of twin lamellae within shear bands. At the TEM scale a second weaker component is noticed. Outside the bands, the twin-matrix lamellae rotate differently and the material reorients to $\{111\}<112>$.

Deformation mechanisms in an age-hardenable Ni-Mo-Cr alloy subjected to cold rolling 807
M. Wróbel, S. Dymek, M. Dollar, M. Blicharski

Mechanisms of deformation in an age-hardenable Ni-Mo-Cr alloy containing large precipitates of the coherent ordered phase were investigated. The dominant deformation mechanism in the examined alloy depended on the applied amount of strain : for low strains micro-twinning within the ordered precipitates and dislocation slip in the matrix prevailed ; at higher strains the f.c.c. twinning became the major deformation mechanism. Micro-twinning within the ordered phase was size related – micro-twins occur in large precipitates at relatively small strains. Twinning within the ordered precipitates may occur in all possible twin systems. Ten out of twelve possible twinning systems lead to the formation of true twins, and the long range order is preserved in the twinned regions. Formation of shear bands at high strains destroys the long range order.

Numerical study of crystalline plasticity : measurements of the heterogeneities due to grain boundaries under small strains 815
F. Barbe, S. Forest, S. Quilici, G. Cailletaud

A finite element 3D polycrystalline aggregate made of 216 grains is subjected to a mean axial deformation up to 1 %. The heterogeneities inside the polycrystal are due to the crystallographic orientations of the grains – this appears at the scale of the mean responses per grain – and to the local interaction between neighbouring grains – this appears at the intragranular scale. The intragranular heterogeneity is measured as a function of the distance to the grain boundary, inside a single grain and for all the points of the microstructure. It is characterized by dispersions of the local responses due to grain boundaries. These measurements correspond to dispersions – variances – ; the statistical errors have also been determined.

Neutron and X-ray diffraction study of Al and Cu during ECA processing and subsequent recrystallization 825
J. Kusnierz, T. Baudin, Z. Jasienski, R. Penelle

The inhomogeneity of deformation in aluminium and copper, processed by Equal-Channel Angular (ECA) pressing, is discussed on the basis of X-ray as well as neutron diffraction pole figure measurements and calculated orientation distribution functions. The influence of short time recrystallization is considered. Structure observations by means of optical microscopy, Electron Back Scattered Diffraction (EBSD) and transmission electron microscopy were used to obtain complete information.

Strain distribution and plastic localization during bending of metal-rubber profiles 835
D. Boscher, M. Gaspérini

Numerical simulation by finite elements of the bending process of aluminium profile coated with rubber was performed, in order to predict the initiation of necking. Special attention was paid to the description of the boundary conditions, to the link between the different stages, and to the analysis of the hardening behaviour during the thermo-mechanical loading. The calculations permit to predict qualitatively the area of potential defect.

Determination of thermal stresses using grazing incidence X-ray diffraction 843
A. Baczmanski, S.J. Skrzypek, K. Wierzbanski, Ch. Braham

The residual stress field in a titanium nitride coating was determined using the X-ray diffraction method based on grazing incident angle

geometry. The first order stress components were determined in TiN coating on WC and on steel substrates. The diffraction elastic constants calculated by the self-consistent method were used for the interpretation of the results. The advantages of the grazing incidence geometry are pointed out in the case of the examination of heterogeneous residual stresses in thin layers.

Stored energy evolution as a function of cold rolling reduction for a Fe-53%Ni alloy and an austenitic-ferritic steel 851
A.L. Etter, M.H. Mathon, T. Baudin, R. Penelle

The energy stored in grains during cold rolling has been evaluated in a Fe-53%Ni alloy and in a duplex stainless steel using neutron diffraction. The measurements of diffraction peak broadening were undertaken to study the influence of stored energy on mechanisms that govern the development of the cube texture in a heavily cold rolled Fe-Ni alloy. The results suggest that the energy difference between the cube and the other main orientations increases with reduction and thus promotes the cube growth during recrystallization. It appears that such a method is relevant for a two-phase material. Furthermore, the energy levels found in the two phases are in good agreement with the strain measurements found in the literature. The austenite phase stores more energy than the ferrite one.

Influence of shear bands on recrystallization of {110}[001] Cu single crystals deformed with a change in the direction of plastic flow 859
T. Moskalewicz, M. Wróbel, M. Blicharski, S. Dymek

Copper single crystals with the {110}[001] initial orientation were cold rolled and subsequently compressed in a channel die with the new direction of plastic flow parallel to the former transverse direction of rolling. The texture formed during subsequent recrystallization showed components which were not characteristic for the texture of the deformed matrix. Shear bands were formed after the change in the direction of plastic flow. Recrystallization commenced within shear bands and proceeded by the growth of selected grains into the deformed matrix. Measurements of the local crystallographic orientations indicated that the processes predicted by the theory of oriented growth played an important role in the formation of recrystallization textures. The orientations of the fast growing grains could be produced as a result of the formation of recrystallization twins.

Shear banding and the formation of Goss and brass texture components in C-{112}<111> oriented silver single crystals 871
H. Paul, J.H. Driver

The microtexture components of 'brass-type' shear bands developed by plane strain compression in twinned C-{112}<111> oriented silver single crystals have been characterized in detail by SEM/EBSD. The twinned matrix exhibits three different reorientation tendencies : 1) a general lattice rotation of the twinned matrix towards the {111}<112> position ; 2) a crystal lattice rotation, within the shear bands, around TD towards {110}<001> which favours the operation of two highly stressed coplanar slip systems of {111}<101> type ; 3) the formation of near S-Brass {123}<634>-{011}<112> texture components by non-equilibrium slip within the shear bands. In low SFE materials the strong intensities of these components result from a saturation of the microstructure by shear bands.

Evolution mechanisms of texture and microstructure during recrystallization of ferritic steel sheets 883
H. Réglé

The formation of recrystallization microstructure and texture in ferritic steel sheets used in the automotive industry is presented and involved mechanisms are discussed in connection with the substructure formed during the deformation preceding the annealing. Nucleation principally happens in the gamma-fibre grains, which develop smaller deformation cells and higher local misorientations than the alpha-fibre grains. The development of the nuclei is then analyzed by analogy with the abnormal coarsening which sometimes occurs after recrystallization. Finally, some relations between recrystallization textures / microstructures and mechanical properties are shown, like the effect of the rolling level on the anisotropy or the decrease of mechanical properties when under-recrystallisation happens.

High resolution crystal orientation measurement techniques for the study of nucleation processes during recrystallization in heavily deformed metals 891
S. Zaefferer

This article presents and discusses some modern techniques for high resolution orientation measurements in electron microscopy, including electron backscatter diffraction (EBSD) in the scanning electron microscope and spot and Kikuchi diffraction as well as dark field conical scanning in the transmission electron microscope. The techniques are compared with respect to their applicability to studies of nucleation processes during recrystallization of highly deformed metals. These investigations make high demands on orientation measurements, as high spatial and angular resolution and insensitivity to lattice defects are required.

Investigation of recrystallization mechanisms in copper alloys 903
Ph. Gerber, J. Tarasiuk, Th. Chauveau, R. Chiron, B. Bacroix

Textures and local orientations have been determined in copper alloys after cold rolling and annealing. The measurements show that for a strain below a given threshold a mixed "deformation-recrystallization" texture is obtained after a static primary recrystallization : the $\{100\}<001>$ cube orientation becomes stronger as annealing proceeds, but is not dominating in the final microstructure. Global texture determinations by X-ray diffraction coupled with local orientation measurements by EBSD (Electron Back-Scattered Diffraction) show that in materials cold rolled by 70 and 80 %, the orientation changes at the very beginning of the recrystallization process (i.e. at nucleation) are crucial for the formation of the recrystallization texture.

ESPAÑOL

Formación de bandas de cizallamiento del tipo « laton » y su influencia sobre el cambio de orientación de los monocristales $\{112\}<111>$ de la aleación Cu-2%Al 797
H. Paul, Z. Jasienski, C. Maurice, A. Piatkowski, J.H. Driver, A. Litwora

Los monocristales de la aleación con débil energía de defecto de apilamiento Cu-2%Al, de orientación inicial $\{112\}<111>$, han sido deformadas por compresión en un útil de punzonamiento con 77 y 293 K. Las evoluciones de microestructura y de microtextura en las bandas de cizallamiento de tipo « latón » formadas en estas condiciones han sido analizadas. Se han utilizado diferentes técnicas

experimentales : MEB/MET, microscopía óptica, medidas de microtexturas por MEB/EBSD y TEM/CBED. Hay primeramente una rotación de los cristales por deslizamiento, después una reorientación por maclado mecánico. Cuando aparecen las bandas de cizallamiento, se observa un aumento de la intensidad en las proximidades de la textura de Goss $\{110\}<100>$, en relación con una rotación de las láminas de maclas en el interior de las bandas de cizallamiento. A la escala del MET, se observa un segundo componente menos intenso. Al exterior de las bandas, la rotación de los agregados macla/matriz conduce a una reorientación hacia $\{111\}<112>$.

Mecanismos de deformación en el laminado en frío en una aleación Ni-Mo-Cr con endurecimiento estructural 807
M. Wróbel, S. Dymek, M. Dollar, M. Blicharski

Los mecanismos de deformación de una aleación Ni-Mo-Cr con endurecimiento estructural han sido estudiados en el caso donde esta aleación contiene una fase ordenada de gruesos precipitados coherentes. El mecanismo preponderante es diferente según la tasa de deformación aplicada : a pequeñas deformaciones es la micro-macla en los precipitados ordenados y el deslizamiento de las dislocaciones en la matriz ; a deformaciones más elevadas es el maclado en la fase c.f.c. En la fase ordenada, la formación de micro-maclas depende del tamaño de los precipitados : en los precipitados mayores, tiene lugar para deformaciones relativamente pequeñas. Todos los sistemas de maclado de esta fase pueden estar activados. Diez sobre doce sistemas posibles conducen a la formación de verdaderas maclas y el orden a gran distancia se conserva en las partes macladas. A deformaciones elevadas, son sobretudo las bandas de cizallamiento las que se forman y se destruye el orden a gran distancia.

Estudio numerico de la plasticidad cristalina : medida de las heterogeneidades debidas a las juntas de grano para deformaciones debiles 815
F. Barbe, S. Forest, S. Quilici, G. Cailletaud

Un agregado tridimensional de 216 granos ha sido sometido a una deformación axial media del 1 %. Las heterogeneidades en este policristal se deben a las variaciones grano a grano de la deformación media de estos granos (efecto cristalográfico) y a las interacciones locales entre granos vecinos (heterogeneidades intragranulares). La heterogeneidad intragranular ha sido evaluada en función de la distancia en la junta de grano en un grano determinado, así como para el conjunto de los puntos de la microestructura. Ella se traduce por variaciones locales de comportamiento ligadas a la influencia de las juntas de grano. La distribución de los valores locales de deformación ha sido evaluada estadísticamente (dispersión), así como su incertitud.

Estudio por difracción de rayos X y de neutrones de muestras de aluminio y cobre hiperdeformadas en un canal acodado (ECA) despues recristalizado 825
J. Kusnierz, T. Baudin, Z. Jasienski, R. Penelle

El desarrollo de las heterogeneidades de deformación en el aluminio y en el cobre elaborados por extrusión de un lingote en un canal acodado de sección constante (« Igual-Canal Angular (ECA) extrusión ») se discute a partir de las figuras de polos medidas por difracción de rayos X y de los neutrones así como las funciones de distribución de las orientaciones cristalinas correspondientes. La microestructura y la textura de los primeros estadios de la recristalización han sido igualmente caracterizados a diferentes escalas por microscopio óptico, difracción de los electrones retrodifusados (EBSD) en un microscopio de barrido y por microscopía electrónica de transmisión.

Distribución y localización de la deformación plástica a partir de la curvatura de perfiles metal-elastómeros..... 835
D. Boscher, M. Gaspérini

Ha sido efectuada la simulación numérica por elementos finitos del procedimiento de curvatura de perfiles en aleación de aluminio recubierto de caucho, con el fin de prever la aparición de la estricción. Una atención particular ha sido llevada a la descripción de las condiciones en los límites, en el encadenamiento de las diferentes etapas y en el análisis del tratamiento en frío durante la carga termomecánica. Los cálculos permiten prever cualitativamente la zona de riesgo.

Determinación de las tensiones de origen térmico por difracción de rayos X bajo incidencia rasante 843
A. Baczmanski, S.J. Skrzypek, K. Wierzbowski, Ch. Braham

Utilizando la difracción de rayos X bajo incidencia rasante se ha determinado el campo de tensiones residuales en un revestimiento de nitruro de titanio (TiN). Los componentes de las tensiones residuales del primer orden han sido determinadas en la capa de TiN sobre los sustratos de carburo de tungsteno (WC) y de acero. Las constantes elásticas de difracción calculadas con el método auto-coherente han sido utilizadas para la interpretación de los resultados experimentales. Las ventajas de la geometría de incidencia rasante son demostradas en el caso de estudio de constantes residuales heterogéneas en las capas delgadas.

Evolución de la energía almacenada en función de la tasa de reducción por laminado para una aleación de Fe-53%Ni y un acero austeno-ferrítico 851
A.L. Etter, M.H. Mathon, T. Baudin, R. Penelle

La energía almacenada por los granos durante la deformación ha sido estimada por difracción de los neutrones, en una aleación de Fe-53%Ni y en un acero austeno-ferrítico laminado en frío. Las medidas de alargamiento de los picos de difracción han permitido comprender mejor la influencia de la energía almacenada sobre los mecanismos de recristalización que conducen a la formación de una textura cúbica acusada en el caso del Fe-Ni fuertemente deformado por laminado. Los resultados muestran que la diferencia de energía almacenada entre los principales componentes de la textura de deformación y la componente « cubo » aumenta con la tasa de reducción y permite así el crecimiento de los granos de orientación $\{100\}<001>$ durante la recristalización. Este método de deformación de la energía almacenada ha sido igualmente utilizado con éxito para un acero bifásico austeno-ferrítico. Los niveles de energía almacenada en cada una de las fases son coherentes con las observaciones publicadas en la literatura. En particular, estos trabajos han mostrado que la austenita almacena más energía que la ferrita.

Influencia de bandas de cizallamiento sobre la recristalización de monocristales $\{110\}<001>$ de cobre deformados con un cambio de la dirección de flujo 859
T. Moskalewicz, M. Wróbel, M. Blicharski, S. Dymek

Los monocristales de cobre de orientación inicial $\{110\}<001>$ han sido deformados por laminado en frío después por compresión plana en un útil de punzonamiento con una dirección de flujo perpendicular a la dirección del laminado precedente. La textura formada a partir de la recristalización ulterior ha revelado componentes que no están directamente ligados a la textura de la matriz deformada. Las bandas de cizallamiento se forman después del cambio de la dirección del flujo. La recristalización se ha iniciado en estas bandas y se sigue por el crecimiento de granos seleccionados hacia la matriz deformada. Las medidas locales de orientación muestran que los fenómenos

previstos por la teoría del crecimiento orientado han jugado un papel importante en la formación de la textura de recristalización. La orientación de los granos en el que el crecimiento es el más rápido podría ser el resultado de la formación de maclas de recristalización.

Influencia de las bandas de cizallamiento sobre la formación de componentes de textura « de Goss » y « del latón » en los monocristales de plata de orientación $\{112\}<111>$ 871
H. Paul, J.H. Driver

Las bandas de cizallamiento de tipo «latón» se desarrollan en los cristales maclados de plata, de orientación C- $\{112\}<111>$, deformados en compresión plana. Los componentes de la microestructura de estas bandas han estado caracterizados por MEB/EBSD. La matriz maclada se reorienta según tres fenómenos : 1) una rotación general de la red de la matriz maclada hacia la orientación $\{111\}<112>$; 2) una rotación de la red cristalina en el interior de las bandas de cizallamiento, alrededor de la dirección transversal, hacia la orientación $\{110\}<001>$, lo que favorece la activación de dos sistemas de deslizamiento fuertemente solicitados, del tipo $\{111\}<101>$; 3) la formación de componentes de textura próxima a la del Latón-S, $\{123\}<634>$ - $\{011\}<112>$, por deslizamiento fuera de equilibrio en las bandas de cizallamiento. En los materiales con pequeña energía de defecto de apilamiento, la fuerte intensidad de estas componentes resulta de la completa invasión de la microestructura por las bandas de cizallamiento.

Mecanismos de evolución de la microestructura y de la textura de las chapas de acero ferrítico durante la recristalización 883
H. Réglé

Se presenta la evolución de las microestructuras y de las texturas durante la recristalización de los aceros destinados a la industria del automóvil y se discuten los mecanismos puestos en juego en relación con las subestructuras de deformación que se forman durante la etapa precedente de laminado. Se muestra que los gérmenes no se desarrollan más que en los granos de la fibra gamma, cuyas células de deformación son más pequeñas y las desorientaciones locales más elevadas que en los granos de la fibra alfa. Su desarrollo se analiza por analogía al aumento anormal, que se observa a veces después de la recristalización. El párrafo final está dedicado a la importancia del control de la recristalización en estos aceros respecto de las propiedades de anisotropía planaria y a las caídas de propiedades mecánicas inducidas por las sub-recristalizaciones.

Técnicas de alta resolución para la determinación de las orientaciones cristalinas a partir del estudio de los fenómenos de germinación durante la recristalización de los metales fuertemente deformados 891
S. Zaefferer

Este artículo describe y evalúa diferentes técnicas modernas de microscopía electrónica permitiendo medidas de alta resolución de las orientaciones cristalinas ; en particular, la difracción de los electrones retrodifusos en microscopía de barrido (EBSD), la difracción puntual, los diagramas de Kikuchi y la técnica DFCS (« Dark Field imaging by Conical Scanning ») en microscopía electrónica de transmisión. Estas técnicas son comparadas desde el punto de vista de su aptitud para permitir estudiar los fenómenos de germinación durante la recristalización de los metales fuertemente deformados. Estos estudios necesitan medidas de orientación de gran calidad, resoluciones espaciales y angulares elevadas, así como una ausencia de sensibilidad a los defectos de red.

Estudio de los mecanismos de recristalización en las aleaciones de cobre 903
Ph. Gerber, J. Tarasiuk, Th. Chauveau, R. Chiron, B. Bacroix

Las medidas de texturas y de orientaciones locales se han realizado sobre las aleaciones de cobre después de las secuencias de laminado en frío-recocido. Ellas han mostrado que por debajo de una tasa de deformación dada, una textura mixta « deformación-recristalización » se obtiene después de la recristalización estática primaria ; la orientación $\{100\}<001>$ se refuerza durante el recocido pero no domina la microestructura final. Las medidas globales de texturas por difracción de rayos X unidas a las medidas locales de orientaciones por EBSD (« Electron BackScattered Diffraction ») en los materiales laminados a 70 y 90 % demuestran que la evolución al comienzo del proceso de recristalización (es decir a partir de la etapa de germinación) es crucial y determina la textura de recristalización.

DEUTSCH

Die Bildung von Scherbändern vom Typ « Messing » und ihr Einfluss auf die Veränderung der Orientierung der Einkristalle $\{112\}<111>$ der Cu-2%Al-Legierung 797
H. Paul, Z. Jasienski, C. Maurice, A. Piatkowski, J.H. Driver, A. Litwora

Einkristalle mit geringer Stapelfehlerenergie der Legierung Cu-2%Al mit der Ausgangsorientierung $\{112\}<111>$ wurden in einem Stanzwerkzeug bei 77 und 293 K druckverformt. Die Entwicklungen von Mikrostruktur und Mikrotextrur in den unter diesen Bedingungen gebildeten Scherbändern vom Typ « Messing » wurden analysiert. Dazu wurden verschiedene Versuchstechniken angewandt : SEM, TEM, Lichtmikroskop, Bestimmungen der Mikrotextruren mittels SEM/EBSD und TEM/ CBED. Zunächst erfolgte eine Drehung der Kristalle durch Gleitung, dann eine Reorientierung durch mechanische Zwillingsbildung. Während des Erscheinens der Scherbänder wurde eine Erhöhung der Intensitäten in der Umgebung der Goss-Textur $\{110\}<100>$ beobachtet, in Verbindung mit einer Drehung der Zwillingslamellen im Innern der Scherbänder. Im Maßstab des MET wurde eine zweite, weniger intensive Komponente, beobachtet. Ausserhalb der Bänder führt die Drehung der Aggregate Zwillings/Grundmasse zu einer Reorientierung in $\{111\}<112>$.

Verformungsmechanismen beim Kaltwalzen in einer ausscheidungshärtenden Ni-Mo-Cr Legierung 807
M. Wróbel, S. Dymek, M. Dollar, M. Blicharski

Die Verformungsmechanismen einer ausscheidungshärtenden Ni-Mo-Cr-Legierung wurden im Fall untersucht, wo diese Legierung eine geordnete Phase grober kohärenter Ausscheidungen enthält. Der vorherrschende Mechanismus ist, entsprechend dem angewandten Verformungsgrad, verschieden. Bei geringen Verformungen ist dies die Mikrozwillingbildung in den geordneten Ausscheidungen und die Gleitung der Versetzungen in der Grundmasse, bei stärkeren Verformungen ist es die Zwillingsbildung in der kfz-Phase. In der geordneten Phase hängt die Bildung von Mikrozwillingen von der Grösse der Ausscheidungen ab : in den grössten Ausscheidungen findet sie bei relativ geringen Verformungen statt. Alle Systeme von Zwillingsbildung dieser Phase können aktiviert werden. Zehn von den zwölf möglichen Systemen führen zur Entstehung echter Zwillinge und die Fernordnung bleibt in den Teilen mit Zwillingen erhalten. Bei stärkeren Verformungen entstehen vor allem Scherbänder, und die Fernordnung wird zerstört.

Numerische Untersuchung der kristallinen Plastizität : Messung der Heterogenitäten infolge der Korngrenzen bei geringen Verformungen 815
F. Barbe, S. Forest, S. Quilici, G. Cailletaud

Eine dreidimensionale Anhäufung aus 216 Körnern wurde einer mittleren axialen Verformung von 1 % unterworfen. Die Heterogenitäten in diesem Vielkristall werden durch die Abweichungen von Korn zu Korn der mittleren Verformung dieser Körner (kristallografischer Effekt) und die örtlichen Wechselwirkungen zwischen benachbarten Körnern (intrakristalline Heterogenität) hervorgerufen. Die intragranulare Heterogenität wurde in Abhängigkeit vom Abstand bis zur Korngrenze in einem bestimmten Korn bestimmt, wie auch für alle Punkte des Mikrogefüges. Sie äussert sich in den örtlichen Veränderungen des Verhaltens, die mit dem Einfluss der Korngrenzen zusammenhängen. Die Verteilung der örtlichen Werte der Verformung wurden statistisch (Varianz) bestimmt, wie auch ihre Messunsicherheit.

Untersuchung von hyperverformten und anschliessend rekristallisierten Aluminium- und Kupfer-Proben in einem gebogenen Kanal (ECA) mittels Röntgenstrahl- und Neutronen-Beugung 825
J. Kusnierz, T. Baudin, Z. Jasienski, R. Penelle

Die Entwicklung von Heterogenitäten der Umformung in Aluminium und Kupfer, hergestellt durch Extrusion aus einem Block in einem gebogenen Kanal konstanten Querschnitts (Equal-Channel Angular (ECA) Extrusion), wird ausgehend von Polfiguren, die mittels Röntgenstrahl und Neutronen-Beugung vermessen wurden sowie den Verteilungsfunktionen der entsprechenden kristallinen Orientierungen, erörtert. Das Gefüge und die Textur der ersten Stufen der Rekristallisation wurden ebenfalls unter verschiedenen Maßstäben mittels der optischen Mikroskopie, der Beugung rückgestreuter Elektronen (EBSD) in einem Raster-Elektronenmikroskop und der Durchlicht- Elektronenmikroskopie, beschrieben.

Verteilung und Lokalisierung der plastischen Verformung während des Formbiegens von Profilen aus Metall-Elastomer 835
D. Boscher, M. Gaspérini

Die numerische Simulation des Formbiegens von gummiüberzogenen Profilen aus Aluminium-Legierung wurde mit dem Ziel durchgeführt, das Auftreten der Einschnürung vorherzusagen, Besondere Aufmerksamkeit wurde der Beschreibung der Grenzbedingungen, dem Ablauf der verschiedenen Stufen und der Untersuchung der Verfestigung während der thermo- mechanischen Beanspruchung gewidmet. Die Berechnungen ermöglichen den Risikobereich qualitativ vorherzusagen.

Bestimmung der thermischen Spannungen mittels Röntgenstrahlbeugung unter streifendem Einfall 843
A. Baczmanski, S.J. Skrzypek, K. Wierzbowski, Ch. Braham

Unter Anwendung der Röntgenstrahlbeugung mit streifendem Einfall wurde das Restspannungsfeld in einer Beschichtung aus Titanitrid (TiN) bestimmt. Die Komponenten der Restspannungen erster Ordnung wurden in der TiN-Schicht auf einer Unterlage von Wolframkarbid (WC) und Stahl bestimmt. Die elastischen Konstanten der Beugung, berechnet mit der autokohärenten Methode, wurden für die Interpretation der Versuchsergebnisse angewandt. Die Vorteile der Geometrie des streifenden Einfalls für den Fall der Untersuchung heterogener Restspannungen in dünnen Schichten werden dargestellt.

Verlauf der gespeicherten Energie in Abhängigkeit vom Reduktionsgrad beim Walzen einer Fe-53%Ni-Legierung und eines austenitisch-ferritischen Stahles 851

A.L. Etter, M.H. Mathon, T. Baudin, R. Penelle

Die im Verlauf der Verformung im Gefüge gespeicherte Energie wurde mittels der Neutronenbeugung in einer Fe-53%Ni-Legierung und in einem kaltgewalzten, austenitisch-ferritischen Stahl bestimmt. Messungen der Verbreiterung der Beugungspeaks erlaubten den Einfluss der gespeicherten Energie auf die Mechanismen der Rekristallisation, die zur Bildung einer ausgeprägten kubischen Textur im Fall der durch Walzen stark verformten Fe-Ni-Legierung führen, besser zu verstehen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Unterschied an gespeicherter Energie zwischen den Hauptbestandteilen der Verformungstextur und der « kubischen » Komponente mit dem Reduktionsgrad grösser wird und so das Wachstum der Körner $\{100\}\langle 001 \rangle$ während der Rekristallisation ermöglicht. Dieses Verfahren zur Bestimmung der gespeicherten Energie wurde ebenfalls mit Erfolg bei einem zweiphasigen austenitisch-ferritischen Stahl angewandt. Die Niveaus an gespeicherter Energie sind in jeder der Phasen kohärent mit den in der Literatur veröffentlichten Beobachtungen. Besonders haben diese Arbeiten gezeigt, dass der Austenit mehr Energie als der Ferrit speichert.

Einfluss der Scherbänder auf die Rekristallisation von Einkristallen $\{110\}\langle 001 \rangle$ von verformtem Kupfer bei einer Veränderung der Fliessrichtung 859

T. Moskalewicz, M. Wróbel, M. Blicharski, S. Dymek

Einkristalle aus Kupfer der Anfangsorientierung $\{110\}\langle 001 \rangle$ wurden durch Kaltwalzen und anschliessend durch Flachstauchen in einem Stanzwerkzeug mit einer Fliessrichtung senkrecht zur vorhergegangenen Walzrichtung verformt. Die während der späteren Rekristallisation gebildete Textur zeigt Komponenten, die nicht unmittelbar mit der Textur der verformten Grundmasse zusammenhängen. Es haben sich Scherbänder nach der Änderung der Fliessrichtung gebildet. Die Rekristallisation startete in diesen Bändern und setzte sich durch Wachstum ausgewählter Körner in die verformte Grundmasse fort. Örtliche Bestimmungen der Orientierung zeigten, dass die nach der Theorie vom orientierten Wachstum vorhergesagten Vorgänge eine wesentliche Rolle bei der Bildung der Rekristallisationstextur gespielt haben. Die Orientierung der Körner mit dem schnellsten Wachstum könnte das Ergebnis der Bildung von Rekristallisationszwillingen sein.

Einfluss der Scherbänder auf die Bildung von Texturbestandteilen « nach Goss » und « von Messing » in Silber-Einkristallen der Orientierung $\{112\}\langle 111 \rangle$ 871

H. Paul, J.H. Driver

Scherbänder vom Typ « Messing » entwickeln sich in Zwillingkristallen aus Silber der Orientierung $C\text{-}\{112\}\langle 111 \rangle$, die durch Flachstauchen verformt wurden. Die Bestandteile der Mikrostruktur dieser Bänder werden mittels MEB/EBSD beschrieben. Die umgeklappte Grundmasse reorientiert sich nach drei Erscheinungen : 1) nach einer allgemeinen Drehung des Gitters der umgeklappten Grundmasse in die Orientierung $\{111\}\langle 112 \rangle$; 2) nach einer Drehung des Kristallgitters im Innern der Scherbänder um die transversale Richtung in die Orientierung $\{110\}\langle 001 \rangle$, was die Aktivierung von zwei hochbeanspruchten, koplanaren Gleitsystemen vom Typ $\{111\}\langle 101 \rangle$, begünstigt ; 3) der Bildung von Texturbestandteilen ähnlich der von Messing-S, $\{123\}\langle 634 \rangle - \{011\}\langle 112 \rangle$, durch Gleitung in den Scherbändern im instabilem Gleichgewicht. In den Werkstoffen mit niedriger Stapelfehlerenergie resultiert die hohe Intensität dieser Bestandteile aus der vollständigen Durchdringung der Mikrostruktur durch die Scherbänder.

Mechanismen der Entwicklung des Mikrogefüges und der Textur in ferritischen Stahlblechen während der Rekristallisation 883

H. Réglé

Die Entwicklung der Mikrogefüge und Texturen während der Rekristallisation in Stählen der Automobilindustrie wird dargelegt, und die beteiligten Mechanismen werden in Verbindung mit den Unterstrukturen der Verformung, die sich während der vorausgegangenen Stufe des Walzens gebildet haben, erörtert. Es wird gezeigt, dass sich die Keime beinahe nur in Körnern der Gamma-Fasern entwickeln, deren Verformungszellen kleiner und deren örtliche Abweichungen von der Orientierung grösser sind als in den Körnern der Alpha-Faser. Ihre Entwicklung wurde im Vergleich zum abnormalen Kornwachstum, das manchmal nach der Rekristallisation stattfindet, analysiert. Der Schlussabschnitt ist der Bedeutung der Beherrschung der Rekristallisation bei diesen Stählen gewidmet, gegenüber den Eigenschaften der ebenen Anisotropie und dem Abfall der mechanischen Eigenschaften, die durch Unter-Rekristallisationen eingeleitet werden.

Techniken mit hoher Auflösung zur Bestimmung von kristallinen Orientierungen bei der Untersuchung der Vorgänge der Keimbildung während der Rekristallisation stark verformter Metalle 891

S. Zaefferer

Dieser Bericht beschreibt und beurteilt verschiedene moderne Verfahren der Elektronenmikroskopie, die Messungen der kristallinen Orientierungen mit hoher Auflösung ermöglichen ; insbesondere die Beugung rückgestrahlter Elektronen mit dem Rasterelektronenmikroskop (EBSD), die Punkt-Beugung, die Diagramme nach Kikuchi und die Dunkelfeldaufnahmetechnik (Dark Field imaging by Conical Scanning) mit dem Durchlicht-Elektronenmikroskop. Diese Techniken werden unter dem Gesichtspunkt ihrer Eignung Keimbildungserscheinungen während der Rekristallisation stark verformter Metalle untersuchen zu können, verglichen. Diese Untersuchungen erfordern Messungen der Orientierung von grosser Qualität, erhöhte räumliche und Winkelauflösung, wie auch Unempfindlichkeit gegenüber Gitterfehlern.

Untersuchung der Mechanismen der Rekristallisation in Kupfer-Legierungen 903

Ph. Gerber, J. Tarasiuk, Th. Chauveau, R. Chiron, B. Bacroix

Bestimmungen der Textur und der örtlichen Orientierungen wurden an Kupfer-Legierungen nach den Folgen Kaltwalzen- Glühen durchgeführt. Sie zeigten, dass unter einer gegebenen Verformungsschwelle eine Mischtextur des Typs « Verformung- Rekristallisation » nach statischer Primärrekristallisation erhalten wird ; die Orientierung $\{100\}\langle 001 \rangle$ wird im Verlauf des Glühens verstärkt, aber sie überwiegt nicht in der endgültigen Mikrostruktur. Globale Bestimmungen der Textur mittels Röntgenstrahlbeugung in Verbindung mit örtlichen Bestimmungen der Orientierungen mittels EBSD (« Electron Back-Scattered Diffraction ») bei 70 und 80 % gewalzten Werkstoffen weisen darauf hin, dass der Entwicklung der Orientierungen ganz zu Anfang des Rekristallisationsprozesses (d.h. während der Stufe der Keimbildung) ausschlaggebend ist und die Rekristallisationstextur bestimmt.