HAL
open science

CHANGEMENTS DE PHASES SOUS CHOC D'UN ACIER Z2 CN 18-10

G. Naulin, J. Ansart

▶ **To cite this version:**

G. Naulin, J. Ansart. CHANGEMENTS DE PHASES SOUS CHOC D'UN ACIER Z2 CN 18-10. Journal de Physique Colloques, 1988, 49 (C3), pp.C3-363-C3-369. 10.1051/jphyscol:1988352 . jpa-00227775

HAL Id: jpa-00227775

https://hal.science/jpa-00227775

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

JOURNAL DE PHYSIQUE
Colloque C3, Supplément au n°9, Tome 49, septembre 1988

CHANGEMENTS DE PHASES SOUS CHOC D'UN ACIER Z2 CN 18-10

G. NAULIN et J.P. ANSART

CEA, Centre d'Etudes de Bruyères-le-Châtel, BP 12, F-91680 Bruyères-le-Châtel, France

Résumé - Nous avons réalisé une série d'expériences de chocs de plaques sur un acier inoxydable Z2 CN 18-10 afin d'étudier les changements de phases pouvant se produire dans ces conditions de sollicitation ($\gamma \rightarrow \alpha'$, $\gamma \rightleftarrows \epsilon$). En faisant varier la vitesse du projectile et l'épaisseur de la plaque impactrice, nous avons exploré un domaine de pressions de choc compris entre 5,0 et 13,0 GPa, et de durée du choc compris entre 0,1 µs et 2 µs. Des analyses quantitatives du pourcentage de phase α', appuyées par des observations au microscope électronique, nous ont permis de tracer des abaques caractéristiques du changement de phase en fonction de la pression de choc et de la durée.

Abstract - Systematic shock recovery experiments have been performed on Z2 CN 18-10 stainless steel (equivalent to 304 SS), shocked in the pressure range 5-13 GPa ; the pulse durations lay between 0,1 µs to 2 µs. The phases transformation γ (fcc) to α' (bcc) is studied. The evolution of microstructures, the nucleation and the coalescence of α' phase embryos have been observed by TEM examinations. Quantitative measurements of α' phase allow plotting diagrams of transformed phases versus shock pressure and pulse duration.

I - INTRODUCTION

Au cours de ces dernières décennies, les études sur le comportement dynamique des matériaux ont pris de plus en plus d'ampleur. L'un des matériaux qui n'a cessé d'être l'objet de l'attention des chercheurs se trouve être l'acier inoxydable Z2 CN 18-10 (norme américaine 304) /1,2/. Nous pouvons, en effet, rencontrer dans la littérature de nombreux rapports d'études portant sur son comportement, tant en tension qu'en compression dynamique. Ce matériau est aujourd'hui devenu pratiquement un cas d'école, permettant de tester les matériels et les méthodes expérimentales. L'un des premiers effets d'un choc sur cet acier est la transformation de phases qu'il est amené à subir : d'un réseau cubique faces centrées (phase γ), à un réseau cubique centré (phase α'), avec éventuellement, une troisième phase ϵ (réseau hexagonal compact). Cette transformation martensitique est sensible à de nombreux paramètres : géométrie du choc, température, déformation, vitesse de déformation ... Notons qu'à côté du comportement dynamique proprement dit, on rencontre nombre de publications portant sur cette transformation du point de vue thermodynamique, bilans énergétiques ... Certains auteurs ont pu définir le mécanisme de la transformation et ont pu développer des modèles. A partir de ces considérations, nous avons mené une série d'expériences de chocs de plaques sur cet acier, le domaine de pressions de chocs et de durée de choc étant respectivement [5 GPa - 13,0 GPa], [0,1 µs, 2 µs]. Nous avons pu mesurer quantitativement le pourcentage de phase transformée et des observations au microscope électronique ont permis de localiser qualitativement celle-ci.

2. TECHNIQUE EXPERIMENTALE

Les essais de chocs de plaques ont été effectués sur un lanceur à gaz léger. Ce canon, de calibre 80 mm, permet de propulser des projectiles à des vitesses pouvant atteindre 700 m/s. La mesure de la vitesse s'effectue juste avant l'impact, à l'aide de deux rayons lumineux diamétraux éclairant deux photodiodes. Le projectile est

Article published online by EDP Sciences and available at http://dx.doi.org/10.1051/jphyscol:1988352

constitué d'une plaque impactrice d'épaisseur variable, imposant la durée du choc, supportée par un matériau de basse impédance, collé sur un sabot (figure 1). Le matériau impacteur est soit du cuivre, soit de l'acier inoxydable. Pour tous les tirs, les cibles impactées sont préparées selon la même configuration : elles se présentent sous la forme d'un disque de 2 mm d'épaisseur (toujours prélevé dans la même tôle) derrière lequel est collée une plaque de 15 mm d'épaisseur (prise dans le même matériau) supportant tous les effets indésirables dus au choc (écaillage notamment). La durée du choc est prise, ici, égale au temps que met une onde de choc à parcourir la double épaisseur de la plaque impactrice. Cette méthode expérimentale nous permet ainsi d'imposer un temps de choc uniquement par l'épaisseur de la plaque impactrice.

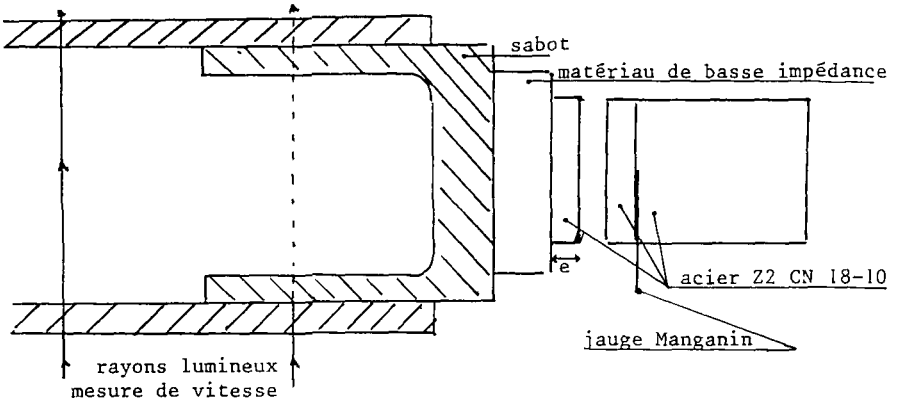


Figure 1 - Schéma du montage expérimental.

Dans certaines expériences, une jauge manganin a été intercalée afin de mesurer la pression de choc, et suivre éventuellement son histoire. Les résultats obtenus étant en bon accord avec la théorie, la pression et la durée du choc, pour les autres cas, ont été calculées à partir des polaires de chocs.

Après le choc, un système d'amortissement permet de recueillir l'échantillon sans autres endommagements que ceux dus au choc. Nous avons donc pu effectuer certaines analyses a posteriori. La phase α' étant la seule phase magnétique, le pourcentage de phase α' a pu être mesuré grâce à un "ferritscope", appareil donnant le pourcentage de phase magnétique dans un échantillon. Nous avons pu aussi noter l'évolution de la dureté. Par la suite, des observations au microscope électronique à transmission ont permis de visualiser et de localiser qualitativement les différentes phases.
Nous avons donc conduit des expériences sur un acier inoxydable Z2 CN 18-10 (norme américaine 304). L'analyse chimique nous donne :

C	Cr	Ni	Mn	Si	S	P	% en poids
0,02	18,05	10,06	1,66	0,38	0,02	0,03	

3 - RESULTATS ET DISCUSSION

Les mesures de duretés effectuées avant et après le choc (figure 2) montrent une nette évolution en fonction de la pression du choc, comme on pouvait le prévoir d'après les résultats de la littérature /3/. Nous trouvons de même une dépendance de la dureté en fonction de la durée du choc : on note un accroissement de près de 30 % entre des durées de choc de 0,1 μs et 2 μs.

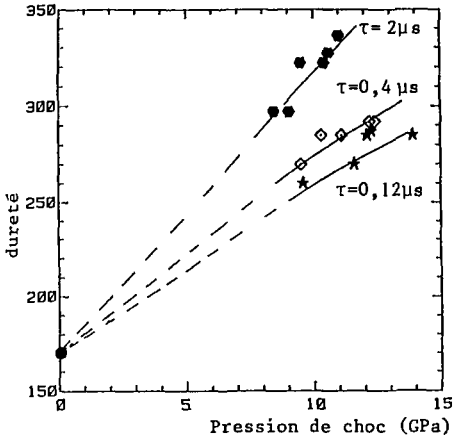


Figure 2

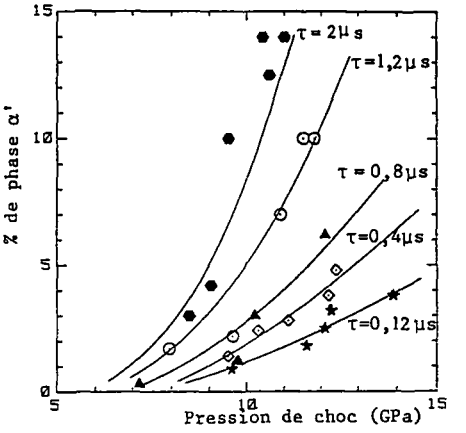


Figure 3.a

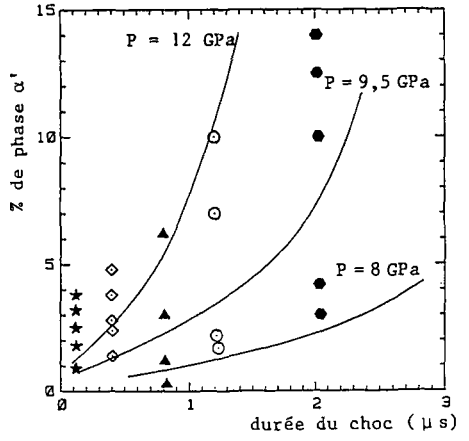


Figure 3.b

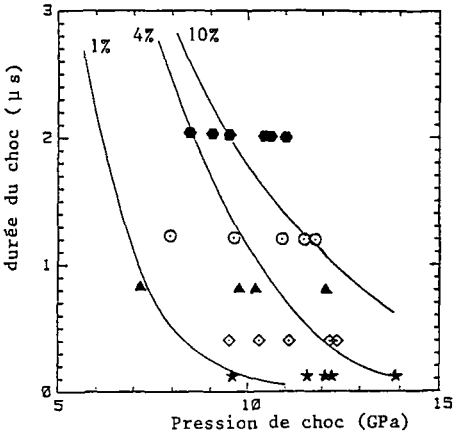


Figure 3.c

Les mesures de densité de phase α' donnent différentes abaques, présentées dans les figures 3 a.,b.,c. L'influence de la pression et du temps de choc y apparaît clairement. L'accroissement du pourcentage de phase α' semble suivre une loi de type exponentiel, tant en fonction de la pression P, que de la durée du choc τ. Nous pouvons trouver dans la littérature, de nombreux rapports étudiant la transformation de phase $\gamma \rightarrow \alpha'$ dans différents cas de sollicitations : en dynamique, en statique, en compression ou en traction, avec parfois l'influence de la température ... Les travaux de Cohen et Olson /4,5/, repris par Murr et al /3/ sur un acier de type 304, nous apportent un modèle donnant le volume de martensite α' en fonction de la déformation plastique ϵ_p.

Ces auteurs partent de la constatation qu'une déformation entraîne une augmentation des fautes d'empilements dans la phase γ, qui peuvent se produire dans la direction (111) du réseau cfc /6/. Le croisement de deux fautes d'empilements peut engendrer

des embryons de martensite α' /7/. Suivant les paramètres de la sollicitation, ces embryons tendent à se développer plus ou moins (figure 4). Olson et Cohen prennent une loi d'accroissement du volume des bandes de cisaillement (fautes d'empilement, mâcles, bandes de martensite ε) de la forme : $\frac{df^{sb}}{1-f^{sb}} = \alpha \, d\varepsilon_p$.

avec f^{sb} volume total des bandes de cisaillement
α constante

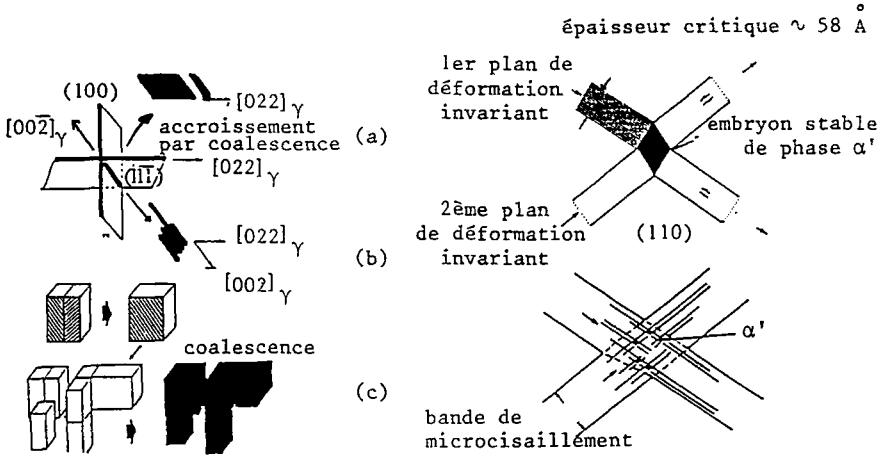


Figure 4 /3/

Schéma montrant la nucléation et l'accroissement de la phase α'
(a) nucléation le long d'une direction à l'intersection de deux bandes de cisaillement.
(b) accroissement et coalescence des embryons.
(c) accroissement final en larges blocs.

Détails de la nucléation de la phase α'.

Ils considèrent ensuite le nombre de bandes, puis la probabilité qu'une intersection produise un embryon de phase α'. Ils aboutissent à une fonction de la forme /8,9/ :

$$f^{\alpha'} = 1 - \exp \{ - \beta \, [1 - \exp (- \alpha \, \varepsilon_p)]^n \} \quad \text{avec :}$$

$f^{\alpha'}$ volume total de martensite α'

ε_p déformation plastique

$\beta = [\frac{\bar{v}^{\alpha'}}{(\bar{v}^{sb})^n}] \, Kp \, , \quad \alpha = f \, (\gamma_{sf} \, , \, \dot{\varepsilon})$

$\bar{v}^{\alpha'}$: volume moyen d'un grain de α'

$\bar{v}^{sb}$: volume moyen d'une bande de cisaillement

K,n : deux constantes

P : probabilité qu'une intersection de deux bandes crée un embryon de α'

γ_{sf} : énergie libre d'une faute d'empilement.

Ce modèle a été appliqué, avec succès, aux points expérimentaux établis par Angel /8/, donnant le pourcentage de phase α' en fonction de la déformation et de la température. Les courbes que nous avons obtenues (figure 3) ne sont pas sans les rappeler, et l'on peut songer à adapter cette modélisation à notre problème.
Cependant, de nombreuses études tendent à démontrer qu'aux grandes vitesses de déformation, le pourcentage de phase α', dû à la déformation tend à se réduire /10, 11/. Dans le cas des chocs de plaques, celle-ci reste faible, et, à l'opposé, la vitesse de déformation est très élevée (de l'ordre de 10^6 s^{-1}). Les paramètres prépondérants dans ce cas, semblent être la pression et la durée du choc, comme cela est confirmé par des études précédentes /12/.
C'est pourquoi nous songeons à reprendre un modèle de la même forme que celle proposée ci-dessus, en remplaçant la déformation ϵ_p par une fonction de la pression P et de la durée du choc τ. Cette fonction reste à définir (en reprenant le raisonnement qui a abouti à cette modélisation) ainsi que les valeurs des paramètres α, β et n qui dépendent a priori aussi de la vitesse de déformation et sans doute du mode de déformation.
Signalons, à ce propos, que certains auteurs se sont aussi intéressés à l'influence du mode de déformation (uniaxial, bi, triaxial). La figure 5 résume les résultats qu'ils ont pu exposer /13/.

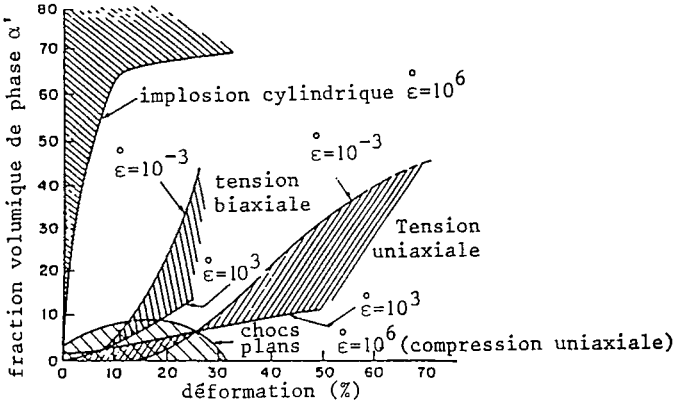
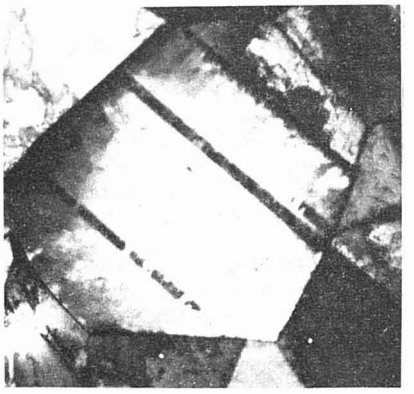


Figure 5 - Fraction volumique de phase α' en fonction de la déformation déformation, vitesse de déformation et mode de déformation /11/.

Les résultats présentés ci-dessus restent en bonne corrélation avec ceux des études précédentes. Cependant, le domaine de pression et de durée du choc (5 - 13 GPa, 0,1-2 μs) est plus bas. Cela nous a permis de mettre en évidence un seuil de pression de choc, en dessous duquel on ne détecte pas de phase α' (environ 5 GPa).

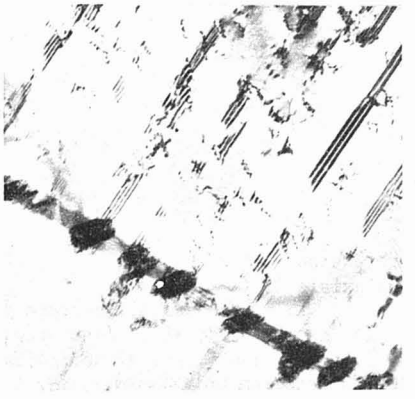
Les observations au microscope électronique à transmission ont permis de définir et de localiser les différentes phases. L'échantillon témoin (figure 6.a) présente une seule phase γ. On a pu observer quelques mâcles importantes, dues au traitement thermique, ainsi qu'une faible densité de dislocations. Les études précédentes localisent la phase α' à l'intersection des bandes de cisaillement : dans le matériau choqué, nous avons donc recherché les mâcles et les fautes d'empilements créées par le choc. De même, les observations rencontrées dans la littérature font état de la présence de la troisième phase ε, mais le domaine de pression et de durées du choc est plus élevé. Les micrographies de la figure 6 montrent l'évolution de la microstructure du matériau en fonction de la pression à durée de choc constante. Avec l'augmentation de la densité de dislocations, nous notons celle des fautes d'empilements, successivement dans une, puis deux et finalement trois directions (111).

A 5 GPa, où nous n'avons pas détecté de pourcentage significatif de phase α', les fautes d'empilements se créent généralement dans une seule direction privilégiée.

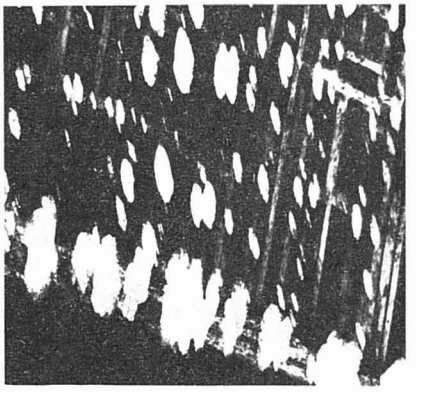


a. échantillon témoin 1 µm

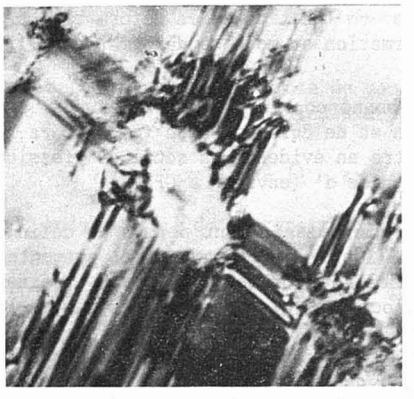
b. P = 5 GPa τ = 0,8 µs 1 µm



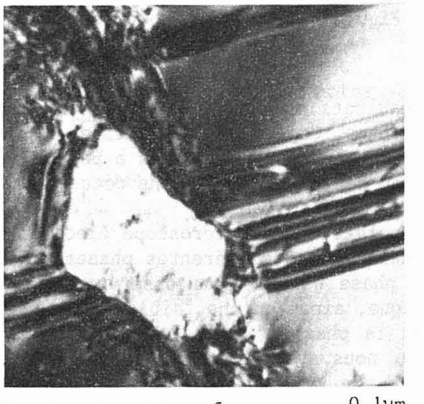
c. P = 7,2 GPa τ = 0,8 µs 1 µm



d. P = 8,7 GPa τ = 0,8 µs 1 µm



e. 0,1µm



f. 0,1µm

Détails de l'évolution d'un embryon de phase α'.

Figure 6 - Acier Z2 CN 18-10 - Microscopies électroniques à transmission. Détails de l'évolution de la microstructure.

La micrographie figure 6.b. représente l'intersection de deux fautes d'empilement sans présence détectable de phase α' : le diagramme de diffraction ne révèle que la présence de phase γ. Les micrographies suivantes montrent la localisation et le le développement de la phase α', conformément aux prévisions. Entre 6,0 et 7,0 GPa, nous avons pu constater que celle-ci n'apparaît pas dans tous les grains. En revanche, au-delà de 8,0 GPa, on rencontre la phase α' dans tout le matériau. Nous retrouvons les relations d'orientations habituelles entre la phase α' et γ, à savoir :

$$(111)_{fcc} \;/\; (101)_{bcc}$$

$$[1\bar{1}0]_{fcc} \;/\; [11\bar{1}]_{bcc}$$

Notons que nous n'avons jamais pu mettre en évidence la transformation $\gamma \rightleftarrows \epsilon$. L'évolution de la pression durant l'expérience, grâce aux jauges manganin, ne montre pas de dédoublement de l'onde de choc, significatif d'un changement de phase important.

4. CONCLUSION

Nous avons mené une série d'expériences de chocs de plaques sur un acier inoxydable Z2 CN 18-10 couvrant un domaine de pression [5,0 , 13,0] GPa et de durée de choc 0,1 à 2,0 µs. Les observations microscopiques montrent qualitativement l'évolution des microstructures, ainsi que les différents stades de nucléation et de coalescence de grains de phase α', formés pendant le choc. Le processus de formation de phase α' à l'intersection des fautes d'empilements correspond aux mécanismes exposés par Murr et Cohen. Nous avons analysé quantitativement le pourcentage de phase α' formée par le choc, et représenté les résultats par des abaques donnant le pourcentage de phase transformée en fonction de la pression et la durée du choc. Les courbes obtenues peuvent être rapprochées de celles données dans un autre cas de figure pour le pourcentage de phase α', formée en fonction de la déformation et de la température. La modélisation éventuelle pourrait donc être de forme similaire. La mise au point de la technique de chocs de courte durée (100 ns) va permettre de relier nos résultats à ceux obtenus par chocs laser. Ainsi, le domaine des durées de choc pourra être étendu aux chocs très courts (10 ns) donnant lieu à des études sur la cinétique du changement de phase.

REFERENCES

/1/ Murr, L.E., Grace, F.I., Trans. of Metall. Society of AIME , 245 (1969) p.225.

/2/ Johnson, K.A., Staudhammer, K.P., Elliott, N.E., Medina, W.J., Shock Waves in condensed matter 1987, Schmidt, S.C., Holmes, N.C., Elsevier Science Pub., 1988

/3/ Murr, L.E., Materials at high strain rates, ed. T.Z. Blazynski, Elsevier Applied Science London and New-York 1987, p. 1.

/4/ Olson, G.B., Cohen, M., Metall. Trans. 7A (1976) p. 1905.

/5/ Olson, G.B., Cohen, M., Metall. Trans. 7A (1976) p. 1897.

/6/ Staudhammer, K.P., Murr, C.E., Ann. Proc. Electron Microscopy Soc. of America (1982), 482.

/7/ Murr, L.E., Staudhammer, K.P., Hecker, S.S., Metall. Trans. A 13A (1982) pp. 619 - 627.

/8/ Thadhami, N.N., Meyers, M.A., Progress in Material Science Vol. 30 (1986) pp 1-37.

/9/ Olson, G.B., Cohen, M., Metall. Trans. 6A (1975), p. 791.

/10/ Staudhammer, K.P., Frantz, L.E., Hecker, S.S., Shock Waves and high strain rate phenomena in metals (1981), ed. by Meyers, L.A., Murr, L.E., Plenum Pub. Cor. p. 91.

/11/ DORMEVAL, R., Comportement en traction d'un acier 304 L - Caractérisation mécanique, magnétisme résiduel. Rapport interne.

/12/ Murr, L.E., Jong-Yuh Huang, Materials Sciences and Eng. 19 (1975), p. 115.

/13/ Johnson, K.A., Murr, L.E., Staudhammer, K.P., Acta. Metall. 33 (1985), p. 677.