MICROSTRUCTURE RÉSIDUELLE D'UN ACIER 304 SOUMIS À UN CHOC LASER. INFLUENCE DU FLUX ET DE LA DURÉE D'IMPULSION LASER

M. Hallouin, M. Gerland

► To cite this version:

M. Hallouin, M. Gerland. MICROSTRUCTURE RÉSIDUELLE D'UN ACIER 304 SOUMIS À UN CHOC LASER. INFLUENCE DU FLUX ET DE LA DURÉE D'IMPULSION LASER. Journal de Physique IV Proceedings, 1991, 01 (C3), pp.C3-519-C3-524. 10.1051/jp4:1991373 . jpa-00250517

HAL Id: jpa-00250517

<https://hal.science/jpa-00250517>

Submitted on 1 Jan 1991

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.

**MICROSTRUCTURE RÉSIDUELLE D'UN ACIER 304 SOUMIS À UN CHOC LASER.
INFLUENCE DU FLUX ET DE LA DURÉE D'IMPULSION LASER**

M. HALLOUIN* et M. GERLAND**

* *Laboratoire d'Énergétique et Détonique, URA CNRS 193,
F-86034 Poitiers Cedex, France*

** *Laboratoire de Mécanique et Physique des Matériaux, URA
CNRS 863, F-86034 Poitiers Cedex, France*

Résumé - L'irradiation d'une cible métallique par un laser pulsé de forte énergie génère dans le matériau, une onde de choc d'amplitude pouvant atteindre le TPa. Des cibles d'acier austénitique ont été soumises à une irradiation laser en géométrie plane; les flux laser utilisés sont compris entre 10^{11} et $5 \cdot 10^{12}$ W/cm² et les durées d'impulsion laser varient entre 0,6 ns et 25 ns. Dans ces conditions d'irradiation, la pression maximum induite dans le matériau est comprise entre 10 GPa et 60 GPa. L'influence de la durée d'impulsion laser et de la pression maximum induite dans l'échantillon, sur la microstructure résiduelle (volume maclé, présence de phase α) a été étudiée par microscopie électronique en transmission ainsi que par des mesures de microdureté.

Abstract - Irradiation of metallic targets by high energy pulsed laser can generate in materials shock waves with amplitudes up to 1 TPa. Experiments were performed on an austenitic stainless steel with plane irradiation in the intensity range 10^{11} to $5 \cdot 10^{12}$ W/cm² and pulse duration at half maximum from 0.5 to 25 ns. In these conditions, the peak pressure at the front surface varies from some GPa to some tens of GPa. Microstructural changes were investigated by transmission electron microscopy in addition to microhardness measurements. The influence of the pulse duration and of the peak pressure on the metallurgical effects has been studied, in particular on microhardness, twin density and the presence of α' -phase.

1 - Introduction.

De nombreuses études ont montré que la microstructure résiduelle d'un acier austénitique soumis à une onde de choc était très sensible aux paramètres du choc : pression maximale induite et temps de maintien en pression. Ces études ont utilisé principalement des moyens conventionnels pour générer ces ondes de choc ; le temps de maintien en pression de l'onde de choc produite est alors de quelques microsecondes et peut, pour certaines expériences atteindre quelques centaines de nanosecondes / 1 / , / 2 / , / 3 /. L'irradiation d'un échantillon plan par un laser pulsé de grande énergie induit dans le matériau une onde de choc d'amplitude variant entre quelques GPa et plusieurs centaines de GPa et de temps de maintien égal à la durée d'impulsion du laser / 4 / ; les temps de maintien obtenus par choc laser sont donc très faibles, de l'ordre du dixième de nanoseconde à quelques dizaines de

2 - Conditions expérimentales

Les expériences ont été réalisées avec le laser impulsif à verre de phosphate dopé avec des ions néodyme, du L. U. L. I de l'Ecole Polytechnique. La cible est constituée d'acier austénitique 304 (% pds- 69.86 Fe, 18.73 Cr, 8.80 Ni, 1.62 Mn, 0.49 Si, 0.17 Cu, 0.14 Mo, 0.065 C, 0.029 P, 0.028 S) ; la taille moyenne des grains est de 25 μm . Les expériences ont été effectuées avec des flux laser incidents variant entre 10^{11} W / cm^2 et $1,65 \cdot 10^{12} \text{ W / cm}^2$, pour trois durées d'impulsion laser : 0,6 ns, 2,5 ns, 25 ns. Pour obtenir de bonnes conditions d'irradiation plane, le diamètre de la tache focale est choisi le plus grand possible, il est compris entre 1 et 4 mm selon l'intensité et la durée de l'impulsion laser. Le pulse laser est gaussien pour les courtes durées d'impulsion : 0,6 ns et 2,5 ns et gaussien coupé pour les durées de 25 ns. La surface de l'échantillon est recouverte d'une mince couche de peinture noire, l'ablation se faisant dans cette couche de peinture et évitant ainsi une élévation de température importante de la cible, liée à la formation du plasma. La pression maximale induite dans la cible est estimée en moyennant les résultats d'une loi d'échelle / 5 / et ceux d'une loi expérimentale. / 6 /. Pour ces expériences, la pression maximale induite à la surface de l'échantillon varie entre 10 GPa et 60 GPa. Le profil de pression dans la cible est calculé en utilisant le code de simulation numérique, monodimensionnel SHYLAC développé au laboratoire / 7 /. Le solide est considéré comme un milieu élasto-plastique parfait obéissant à l'équation d'état de Mie - Gruneisen ; les données utilisées par le code sont le coefficient de Mie-Gruneisen du matériau, la relation linéaire expérimentale / 8 /, reliant la vitesse de choc et la vitesse particulaire et la limite élastique en traction simple.

Après choc, des mesures de microdureté sont effectuées à la surface de l'échantillon et, sur quelques essais, sur une coupe transversale, avec un poids de 25 g. Les lames pour l'observation au microscope électronique en transmission (MET) sont tout d'abord polies mécaniquement jusqu'à 90 μm , puis amincies par la technique du double jet avec un bain de 95 % d'acide acétique et 5 % d'acide perchlorique, à une température de 15°C sous une tension de 70 V. La face irradiée est protégée par un film de plastique, que l'on retire peu avant la fin de l'amincissement ; il est ainsi possible d'effectuer des observations au MET à des profondeurs données dans l'échantillon.

3 - Résultats expérimentaux

L'évolution de la microdureté à la surface des échantillons est montrée sur la figure 1 en fonction du flux laser incident et sur la figure 2 en fonction de la pression maximale induite dans la cible. La dureté initiale de cet acier est de 190 kg /mm². On observe peu de différences entre les durées d'impulsion de 0,6 ns et 2,5 ns, sinon des valeurs de microdureté légèrement supérieures pour 2,5 ns. La microdureté à la surface de la cible augmente tout d'abord avec le flux laser incident jusqu'à une valeur de $5 \cdot 10^{11} \text{ W / cm}^2$ (Pression maximale de 25 GPa), puis reste pratiquement constante jusqu'à une valeur de $1,5 \cdot 10^{12} \text{ W / cm}^2$ ($P_{\text{max}} = 55 \text{ GPa}$), puis diminue ensuite. Pour une durée d'impulsion de 25 ns, les valeurs de microdureté à la surface de l'échantillon sont faibles par rapport à celles des deux autres durées d'impulsion ; ceci est sans doute dû à un effet thermique associé à la formation du plasma, l'épaisseur

de peinture protectrice n'étant pas assez importante pour cette durée d'impulsion laser. Les mesures de microdureté effectuées sur une section de l'échantillon perpendiculaire à la surface impactée, confirme cette hypothèse. On observe en effet sur les échantillons irradiés avec un pulse laser de 25 ns un maximum de microdureté à 20 μm . Hormis cette anomalie, ces profils de microdureté montrent, pour toutes les durées d'impulsion, une décroissance avec la profondeur dans la cible. Cette

Fig. 1 Microdureté à la surface de l'échantillon en fonction du flux laser incident pour trois durées d'impulsion.

Fig. 2 Microdureté à la surface de l'échantillon en fonction de la pression maximale induite.

Fig. 3 Microdureté à une profondeur donnée dans la cible, en fonction de la pression calculée à cette profondeur, pour une durée d'impulsion de 0,6 ns.

Fig. 4 Evolution de la microstructure résiduelle avec la durée d'impulsion laser et la pression calculée par le code SHYLAC, à la profondeur d'observation au MET.

décroissance est d'autant plus rapide que la durée d'impulsion est courte : ainsi, pour des pressions de l'ordre de 25 GPa, la profondeur affectée par une augmentation de durcissement est voisine de 100 μm pour une durée d'impulsion de 0,6 ns, de 250 μm pour une durée de 2,5 ns, et 500 μm pour 25 ns. Si l'on trace sur un même diagramme les profils de microdureté obtenus pour plusieurs essais à une même durée d'impulsion de 0,6 ns en fonction de la pression calculée par le code SHYLAC, on obtient une bonne superposition des courbes (Fig. 3) faisant apparaître d'une part un seuil en pression, situé vers 10 GPa et d'autre part un effet de saturation vers 35 GPa qui correspond à celui observé en surface (Fig.2).

La microstructure résiduelle observée par MET, déjà décrite dans le cas des aciers inoxydables 304 et 316 / 9 /, / 10 / est semblable à celle rapportée dans la littérature / 1 /, / 2 /, / 3 / pour des échantillons de 304 soumis à des chocs conventionnels ; elle est caractérisée par un mélange de macles, fautes d'empilement et phase ϵ (noté "macles" dans la suite du texte), des dislocations et parfois des embryons de phase α' à l'intersection des bandes de déformation. Cette microstructure a été quantifiée en comptant le nombre de systèmes de macles dans chaque grain.

Des exemples de microstructures observées par MET sont donnés sur la figure 5 pour différentes pressions et trois durées d'impulsion laser. L'évolution de la microstructure résiduelle est reportée sur la figure 4 pour les trois durées d'impulsion : 0,6 ns, 2,5 ns et 25 ns. On constate que quelle que soit la durée d'impulsion, le nombre de systèmes de macles augmente avec la pression jusque vers 23 GPa et décroît par la suite. On a pu observer également que la distance inter-macles diminue quand la pression augmente pour une durée d'impulsion donnée. Par contre cette distance est beaucoup moins sensible à la durée d'impulsion laser ; on constate cependant que les durées d'impulsion faibles favorisent les petites distances inter-macles. Pour les faibles flux et des pressions de l'ordre de 10 GPa, la microstructure est essentiellement composée de dislocations pour une durée de 0,6 ns alors qu'elle est presque exclusivement composée de macles à 25 ns. En ce qui concerne la phase α' , les faibles quantités formées et les difficultés pour la mettre en évidence entraînent des incertitudes assez grandes. Cependant, les résultats suivants peuvent être avancés : des traces de phase α' sont observées à 25 ns pour une pression de 11 GPa, des embryons α' à 2,5 ns pour une pression de 15 GPa et des traces à 0,6 ns pour une pression de 15 GPa. D'une manière générale ces quantités augmentent avec la pression et/ou la durée d'impulsion. Cependant, si la phase α' dépend fortement de ces deux paramètres, la densité de défauts et la microdureté dépendent davantage de la pression que de la durée d'impulsion.

4 - Discussion

Les mesures de microdureté et l'observation au MET confirment que la microstructure résiduelle de l'acier 304 après choc laser est pratiquement identique à celle obtenue par choc conventionnel, avec une évolution avec la pression relativement semblable. On observe en effet sur les échantillons une action maximale de l'onde de choc entre 25 GPa et 55 GPa (noté : domaine de saturation) ; dans ce domaine de pression, la microdureté passe par un maximum, et le nombre de systèmes de macles y est également plus élevé. Cependant, quelques différences demeurent ; on peut en particulier constater que le maximum de microdureté en surface atteint par choc laser est plus petit que celui atteint par choc conventionnel ; en effet le maximum de microdureté obtenu par Murr et Rose (avec une charge de microdureté de 200 g) est de 400 kg / mm^2 / 1 / tandis que notre maximum, transposé

1 μm

Fig.5 Evolution de la microstructure résiduelle en fonction de la pression et de la durée d'impulsion laser.

d'une charge de microdureté de 25 g à une charge de microdureté de 200 g, / 11 / est en fait de 320 kg / mm². D'autre part la décroissance de la microdureté à la surface des échantillons, qui se manifeste aux pressions élevées, intervient vers 55 GPa dans notre étude alors qu'elle débute vers 80 GPa dans les travaux de Murr et Rose / 1 /. La décroissance plus précoce de la microdureté dans notre cas peut être due à un effet thermique associé à la moins bonne efficacité de l'écran de peinture noire à fort flux laser.

L'influence du temps de maintien de l'onde de choc sur la microstructure résiduelle est peu importante dans le domaine de pression correspondant à la saturation (25 GPa- 55 GPa), mais elle est marquée au niveau du seuil situé vers 10 GPa, où les effets du choc sur la microstructure résiduelle croissent avec la durée d'impulsion laser. Dans la zone de saturation, à 25 GPa, la distance inter-macles semble diminuer avec le temps de maintien du choc, depuis 0,4 µm à 2 µs / 12 /, jusqu'à 0,2 µm à 0,6 ns. Dans cette gamme de pression, on observe aussi une légère augmentation de la taille des embryons α' (Fig.5) avec le temps de maintien du choc.

Cette étude montre que la microstructure résiduelle et la microdureté sont peu sensibles au temps de maintien du choc dans la zone de saturation (25 GPa- 55 GPa), ce qui confirme les conclusions de Murr / 13 / selon lesquelles le paramètre de choc principal est la pression ; cependant à faible pression le temps de maintien du choc semble avoir une certaine importance.

Références

- / 1 / L.E. Murr, M.F. Rose, Phil Mag. 18, 281, 1968.
- / 2 / L.E. Murr, K.P. Staudhammer, Materials Science and Engineering, 20, 35, 1975.
- / 3 / K. P. Staudhammer, C. E. Frantz, S. S. Hecker, and L. E. Murr, in Shock Waves and High Strain-Rate Phenomena in Metals : Concepts and Applications (ed.), M. A. Meyers, and L. E. Murr, Plenum Press. New York, 91, 1981.
- / 4 / J. Fournier, Thèse, Ecole Polytechnique, 1989.
- / 5 / R. Fabbro, E. Fabre, F. Amiranoff, C. Garban-Labaume, J. Virmont, M. Weinfeld, and C. E. Max, Physics Revue A, 26, 2289, 1982.
- / 6 / J. Grun, R. Decoste, B. H. Ripin, and J. Gardner, Applied Physics Letters, 39, 545, 1981.
- / 7 / F. Cottet, and M. Boustie, Journal of Applied Physics, 66, 4067, 1989.
- / 8 / Compendium of shock wave data, U.C.R.L., 50 108, édité par "Lawrence Radiation Laboratory", Université de Californie, Livermore, 1966.
- / 9 / M. Hallouin, M. Gerland, J. P. Romain, F. Cottet, and L. Marty, Journal de Physique, Colloque C3, Supplément au n° 9, 413, 1988.
- / 10 / M. Hallouin, M. Gerland, Mémoires et Etudes Scientifiques Revue de Métallurgie, 9, 506, 1989.
- / 11 / H. Bückle, Publications scientifiques et techniques du ministère de l'air, N.T. 90, 1960.
- / 12 / L. E. Murr, in Shock Waves and High Strain-Rate Phenomena in Metals : Concepts and Applications (ed.), M. A. Meyers, and L. E. Murr, Plenum Press. New York, 607, 1981.
- / 13 / L. E. Murr, Materials at High Strain-Rate, (ed.), T.H. Blazynski, Elsevier Applied Science 1, 1987.