

05;12

Анализ условий сверхглубокого проникания порошковых частиц в металлическую матрицу

© С.Е. Алексенцева, А.Л. Кривченко

Научно-исследовательский институт проблем конверсии и высоких технологий при Самарском государственном университете, 443100 Самара, Россия

(Поступило в Редакцию 12 сентября 1997 г.)

Рассматриваются критические условия существования процесса сверхглубокого проникания частиц при взаимодействии потока высокоскоростных частиц с материалом матрицы с позиции неравновесной термодинамики. На примере алюминиевых и медных образцов качественно решена задача об изменении энтропии в соответствии с величиной их деформации в процессе нагружения. Показано, что сверхглубокое проникание частиц является системным процессом массоэнергообмена за счет развитой неустойчивости в материале, вызванной ударно-волновым воздействием потока частиц. Степень неравновесности процесса описывается зависимостью изменения энтропии от деформации материала матрицы. Выявлено, что процесс сверхглубокого проникания частиц осуществляется только в области, лежащей за точкой бифуркации.

Обработка металлов потоком высокоскоростных частиц, сформированным в ударной волне, приводит к реализации эффекта сверхглубокого проникания частиц. При скоростях метания частиц 1.5–2 km/s достигается проникание в металлическую матрицу на глубину до 1000 диаметров метаемых частиц, давление при соударении составляет ~ 15 GPa и выше [1].

Основной задачей данной работы является рассмотрение критических условий, в пределах которых протекает процесс сверхглубокого динамического микролегирования. Несмотря на сложность явлений, происходящих при взаимодействии ударных волн с металлами, можно оценить термодинамические условия протекания процесса, рассматривая ряд последовательных состояний, в которых находится матрица при воздействии потока высокоскоростных частиц.

Металл как динамическая система до обработки находится в состоянии устойчивости. После приложения определенного давления, когда превзойден динамический предел текучести, в системе происходят необратимые изменения. На основании 2-го начала термодинамики и закона сохранения энергии деформируемый металл в состоянии пластичности является сильнонеравновесной термодинамической системой [2]. При этом энтропия является показателем обратимости процесса и мерой степени беспорядка. После достижения динамического предела текучести процессы являются необратимыми, что обусловлено изменением энтропии.

Металлическая матрица представляет собой подсистему, которая взаимодействует с потоком высокоскоростных частиц, сформированным в ударной волне. Материал матрицы обменивается с потоком как энергией, так и веществом, о чем свидетельствуют проникающие в глубь материала частицы. Поэтому взаимодействие направленного потока частиц с металлической матрицей можно рассматривать как единую термодинамическую систему.

Воздействие потока высокоскоростных частиц формирует ударную волну в материале матрицы. При некото-

ром характерном давлении (p_1) начинается пластическое течение материала, которому соответствует излом на ударной адиабате. Значение этого давления, а также динамического предела текучести σ_{dyn} , статического предела текучести $\sigma_{0.2}$ для Al и Cu по данным работ [3,4] приведены в таблице.

Из таблицы видно, что при воздействии потока высокоскоростных частиц напряжения в матрице меди и алюминия превышают предел текучести, за которым начинается необратимое пластическое деформирование. Степень деформирования рассмотренных металлов при импульсном воздействии в зависимости от объема матрицы V может быть оценена по формуле [5]: $\varepsilon = 4/3 \ln V/V_0$. При реализации сверхглубокого проникания частиц значения деформации составляют 16–21%.

Металл	p_1 , GPa	σ_{dyn} , GPa	$\sigma_{0.2}$, GPa	$\sigma_{\text{dyn}}/\sigma_{0.2}$
Al	0.22	0.119	0.07	1.7
Cu	0.60	0.233	0.08	2.8

Напряжение течения для сверхглубокого проникания частиц превышает деформацию Чернова–Людерса. Она может быть описана следующей зависимостью [6]: $\sigma_T = \sigma_0 \varepsilon^n$, где ε — пластическая деформация; n — постоянная, обычно $n \approx 0.3-0.4$ [7]; σ_0 — константа для различных металлов и при импульсном нагружении значение ее по физическому смыслу соответствует пределу упругости на адиабате Гюгонио, что хорошо согласуется с данными [7].

Кривые зависимости $\sigma \rightarrow \varepsilon$ для Al и Cu представлены на рис. 1. Как видно, они имеют качественную корреляцию и отражают исходное состояние (точка 0), достижение динамического предела текучести (точка c) и состояние деформированной металлической матрицы при сверхглубоком проникании частиц (точка d).

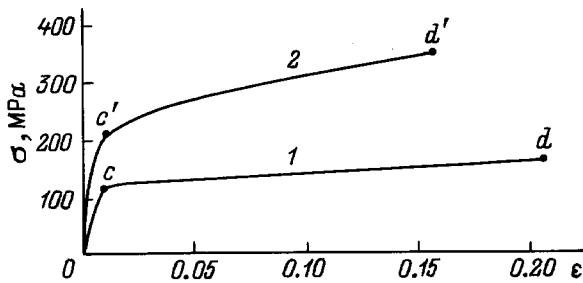


Рис. 1. Кривые состояний деформирования металлической матрицы при обработке потоком высокоскоростных частиц. 1 — алюминий, 2 — медь.

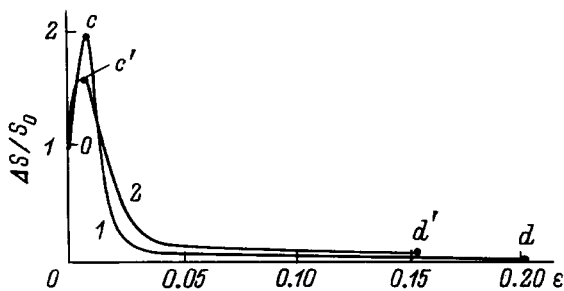


Рис. 2. Зависимость относительного изменения энтропии от степени деформации. 1 — в алюминии, 2 — в меди.

Характеристику состояний деформируемого металла и изменение энтропии можно определить с использованием методики на основе реологической модели упруговязкопластического тела с линейным упрочнением, предложенной в работе [8]. Данная модель описывает деформируемый металл с непрерывным спектром времен релаксации и пределов текучести τ .

Изменение статистической энтропии от исходного состояния базируется на определении энтропии по Ландау-Лифшицу [9]

$$\Delta S = -R \int_0^{\tau} f(\tau) \ln f(\tau) d\tau,$$

где R — универсальная газовая постоянная; $f(\tau)$ — плотность вероятности, характеризующая термодинамическое состояние системы в целом и соответствующая переходу к необратимому состоянию; значение безразмерного предела текучести τ отражает энергетическое состояние в локальной области.

На рис. 2 показано изменение энтропии в соответствии со степенью деформирования металла при импульсном нагружении потоком высокоскоростных частиц. Переход в новое состояние характеризуется изменением энтропии и максимумом на кривой. После достижения динамического предела текучести начинается образование новых структурных уровней. Эта область определяет зону существования сверхглубокого динамического микролегирования. Резкое падение кривой изменения энтропии отвечает и подтверждается большим

числом экспериментальных данных о лавинообразном образовании дислокаций при ударных нагружениях и преобразовании энергий полей упругих напряжений в поверхностную энергию новой межзеренной границы. Уже при деформации 5–7% и давлении ~ 1 ГПа имеют место множественное скольжение и ячеистая структура в меди [4]. Импульсное нагружение вызывает изменение энергии взаимодействия между атомами. При этом частота перескоков атомов в ядре выше, чем в равновесной решетке, что соответствует возрастанию коэффициента диффузии.

Показанное на рис. 2 изменение энтропии может объяснить почему не происходит глубокого проникания при обстреле матрицы одиночными частицами, так как при бомбардировании металлической матрицы одиночной частицей характер ее воздействия соответствует области 0–с, где металл еще находится в равновесном состоянии и обладает энергией полей упругих напряжений.

Таким образом, при рассмотрении критических условий существования процесса сверхглубокого проникания частиц установлено, что металлическая матрица испытывает в соответствии с величиной деформации комплекс состояний и изменение термодинамического потенциала. Сверхглубокое проникание частиц представляет собой системный процесс обмена энергией и веществом за счет развитой неустойчивости в материале, вызванной ударным воздействием высокоскоростных частиц. До точки бифуркации процесс частиц, вероятно, существовать не может.

Список литературы

- [1] Andilevko S.K., Shilkin V.A., Usherenko S.M. et al. // Int. J. Heat Mass Transfer. 1993. Vol. 36, N 4. P. 1113–1124.
- [2] Николис Ж., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. 512 с.
- [3] Баум Ф.А., Орленко М.П., Станюкович К.П. Физика взрыва. М.: Наука, 1975. 704 с.
- [4] Строение металлов, деформированных взрывом / Под ред. Г.Н. Эпштейна. М.: Metallurgy, 1988. 280 с.
- [5] Прюммер Р. Обработка порошкообразных материалов взрывом / Пер. с нем. М.: Мир, 1990. 128 с.
- [6] Физическое металловедение / Под ред. Р.У. Кана, П. Хаазена. Т. 3. Пер с англ. М.: Metallurgy, 1987. 663 с.
- [7] Mechanical Metallurgy / Ed. George E. Dieter, jr. McGraw-Hill Book Company, 1961. 615 p.
- [8] Григорьев А.К., Колбасников Н.Г., Фомин С.Г. Структурообразование при пластической деформации металлов. СПб.: Изд-во ун-та, 1992. 244 с.
- [9] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика, Т. 5. Статистическая физика. М.: Наука, 1976. 680 с.