



УДК 539.219.3:53.09

© 2007

В. Ф. Мазанко, В. С. Михаленков, Е. А. Цапко, Е. И. Богданов,  
В. П. Бевз, С. П. Ворона

### Особенности дефектообразования при импульсном ударном сжатии

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины Ю. Н. Ковалем)

*The results of studies of the peculiarities of the mass-transfer and defect-forming in Cu under pulse shock compression and rolling by using a radioactive isotope ( $^{63}\text{Ni}$ ) and positron spectroscopy are presented. It is established that the pulse shock compression leads to the acceleration of the mass-transfer. Under rolling, this effect was not observed. The mass-transfer coefficients and their dependence on the shock compression parameters are determined. It is shown that no vacancies are formed under the shock treatment. Therefore, they are not responsible for the mass-transfer acceleration.*

Обнаружение эффекта ускоренного массопереноса в металлах при импульсном ударном сжатии [1, 2] и сложности физической интерпретации экспериментальных результатов потребовали от исследователей более внимательного отношения к выяснению вопроса о природе структурных дефектов, возникающих при указанной обработке. Эксперименты показали, что массоперенос при импульсном сжатии характеризуется чертами диффузионного процесса, имеющего объемный характер.

Предположение о межузельном механизме массопереноса при указанном воздействии вызвало много возражений, поскольку энергия образования этих дефектов очень высока, а концентрация и время жизни очень малы. В то же время особенности вакансионного механизма таковы, что он не может обеспечить наблюдаемые экспериментально глубины проникновения атомов за времена  $10^{-1}$ – $10^{-4}$  с. Механизмы образования при скоростной пластической деформации как межузельных атомов, так и вакансий хорошо разработаны и возможности их реализации не вызывают сомнений [3, 4]. Вопрос о природе дефектов, образующихся при импульсном ударном сжатии, остается открытым и без ответа на него описать механизм ускоренного массопереноса, на наш взгляд, невозможно. В связи с этим в настоящей работе проведено исследование типа дефектов и их эволюции при различных видах пластической деформации.

**Методика эксперимента.** В качестве объекта исследования была выбрана отожденная поликристаллическая медь марки МО чистотой 99,97%. Импульсное ударное сжатие

образцов падающим грузом проводили на специальной установке [5]. Параметры импульсной обработки были следующие: длительность импульса  $\tau \sim 10^{-4} \div 10^{-3}$  с, температура — комнатная, энергия удара  $E = 175 \div 710$  Дж, скорость деформации ( $\dot{\epsilon}$ ) при указанных параметрах нагружения составляла  $\dot{\epsilon} \sim 10^2$  с $^{-1}$ . Для изучения параметров массопереноса в этих условиях нагружения использовали метод радиоактивных изотопов, в частности, изотоп никеля  $^{63}\text{Ni}$ . Распределение изотопа в образце определили методом снятия слоев и автордиографии, оценку значений коэффициентов массопереноса — по методу П. Л. Грузина [6] с учетом деформации образца в процессе импульсного нагружения [7].

Параллельно проводили исследование особенностей дефекто-образования методом позитронной спектроскопии. Использование позитронной спектроскопии не случайно, так как этот высокочувствительный метод широко применяется для диагностики дефектов вакансионного типа [8]. Изучали дефектность металла непосредственно после импульсного нагружения и эволюцию ансамбля дефектов в процессе последовательного ступенчатого отжига образцов с повышением температуры от комнатной до 400 °С.

Кроме того, было предпринято сравнительное исследование дефекто-образования при деформации прокаткой ( $\dot{\epsilon} \approx 10^{-1}$  с $^{-1}$ ). Спектры угловой корреляции аннигиляционного излучения (УКАИ) измеряли с помощью длиннощелевого спектрометра с угловым разрешением 0,7 мрад в интервале углов от  $-35$  до  $+20$  мрад. Анализ спектров УКАИ производился в представлении их как суперпозиции обращенной параболы и гауссового распределения:

$$I(\theta) = I_p(\theta) \left( 1 - \frac{\theta^2}{\theta_F^2} \right) + I_g(\theta) \exp \left( -\frac{\theta^2}{2\sigma^2} \right), \quad (1)$$

где  $I_p(\theta)$ ,  $I_g(\theta)$  — соответственно интенсивности параболической и гауссовой кривых в пике УКАИ;  $\theta_F$  — фермиевский импульс;  $\sigma$  — дисперсия гауссианы, связанная с расстоянием  $r_m$ , на котором произведение волновых функций позитрона и электрона имеет максимум

$$r_m = \sqrt{3} \frac{\hbar}{mc} (\sqrt{2\sigma})^{-1}. \quad (2)$$

Здесь  $\hbar$  — постоянная Планка;  $m$  — масса электрона;  $c$  — скорость света. Основным анализируемым параметром служила приведенная площадь под параболической компонентой  $S_P/S$ , где  $S$  — полная площадь под спектром УКАИ. Разделение УКАИ на компоненты производилось по методу, описанному в [9]. Известно, что увеличение концентрации дефектов, захватывающих позитроны, приводит к возрастанию  $S_P/S$  до того момента, пока дефектов не станет настолько много, что все позитроны будут аннигилировать только из захваченного ими состояния, после чего возрастание  $S_P/S$  прекращается. Для прокатной меди этот момент наступает вблизи степени деформации, равной 0,25 [10].

**Результаты и их обсуждение.** Исследование процессов массопереноса в меди при импульсном нагружении показало, что в результате скоростной пластической деформации атомы радиоактивного изотопа  $^{63}\text{Ni}$  проникают за тысячные доли секунды в медь на макроскопическую глубину, достигающую 10 мкм.

Из анализа представленной на рис. 1 концентрационной кривой  $C(x)$  следует, что распределение атомов никеля в поликристаллической меди описывается экспоненциальной зависимостью, свидетельствующей об объемном характере массопереноса. Это подтверждает также линейный характер зависимости (см. рис. 1):

$$\ln C = f(x^2), \quad \text{где} \quad c = \frac{N_n}{X_n}.$$

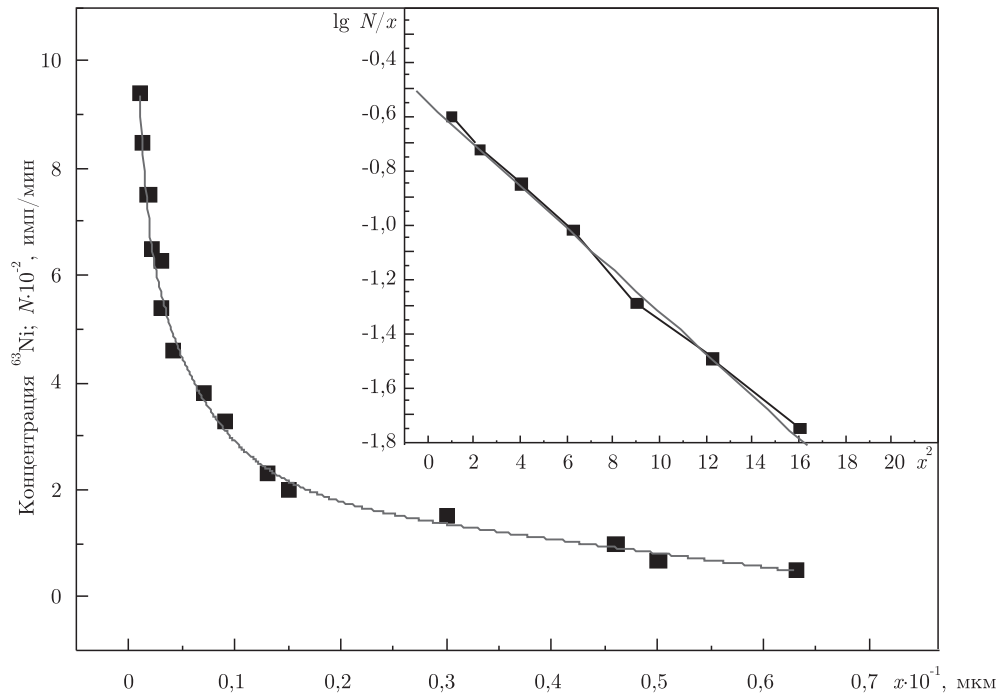


Рис. 1. Концентрационный профиль распределения  $^{63}\text{Ni}$  в импульсно сжатой меди при комнатной температуре, скорость деформации  $\dot{\epsilon} = 280 \text{ c}^{-1}$

В этом случае общее выражение, описывающее концентрационное распределение никеля в меди после импульсного нагружения, выглядит так:

$$C(x) = \frac{C_0}{2\sqrt{\pi D_m \tau}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_m \tau}\right). \quad (3)$$

Здесь  $C_0$  — исходная концентрация изотопа;  $D_m$  — коэффициент массопереноса;  $\tau$  — длительность процесса деформации.

Детальный анализ концентрационных профилей свидетельствует также о том, что в интервале остаточных деформаций 10–70% наблюдается (рис. 2) немонотонное увеличение глубины проникновения никеля  $X$  в зависимости от удельной энергии импульсного нагружения  $E/V$  ( $E$  — энергия импульсного воздействия;  $V$  — первоначальный объем образца) от 3,7 до 9,5 мкм. Эта зависимость описывается в линейном приближении простой функцией:

$$X = 3,807 + 0,008 \cdot \frac{E}{V}. \quad (4)$$

Подобную форму имеет и зависимость  $X$  от степени пластической деформации меди. В то же время при прохождении через медь плоской ударной волны ( $\dot{\epsilon} \sim 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ ) с амплитудой 40 ГПа глубина проникновения  $^{63}\text{Ni}$  в медь в интервале деформаций от 20 до 48% уменьшилась от 100 до 25 мкм [11].

Изучение вопроса о типе дефектов, образующихся при импульсном ударном сжатии и прокатке проводилось, как отмечалось выше, методом позитронной спектроскопии. Анализ спектров УКАИ с позиции влияния на массоперенос степени пластической деформации

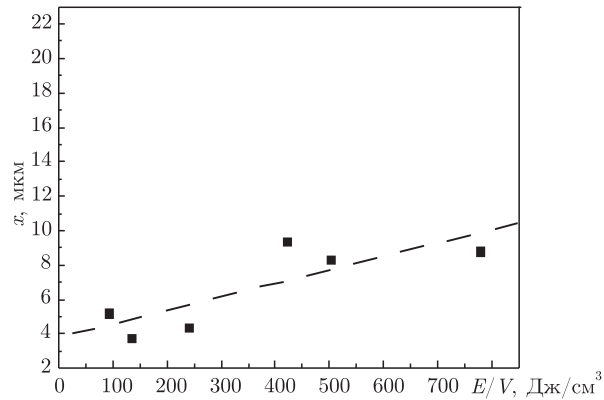


Рис. 2. Зависимость глубины проникновения атомов никеля от удельной энергии импульсного сжатия меди

и дефектов вакансионного типа, образующихся при импульсном ударном сжатии, показал следующее. В пределах ошибки эксперимента значения для образцов, деформированных ударом и прокаткой, укладываются на одну кривую. Этот факт свидетельствует об идентичности постдефектов, формирующихся при указанных видах обработки.

Для проверки этого вывода образцы, деформированные прокаткой и ударом на 50%, были подвергнуты ступенчатому изохронному (0,5 ч) отжигу в атмосфере аргона при последовательно возрастающих температурах с шагом в 40 °С. После каждой ступени отжига измерялся спектр УКАИ. Полученные спектры представлены на рис. 3, откуда следует, что полученные зависимости носят сложный характер, однако температурные интервалы, в которых наблюдаются основные особенности поведения  $S_P/S$ , одинаковы для обоих типов деформации. При повышении температуры отжига обнаруживается несколько стадий изменения  $S_P/S$ . На первой стадии (до 100 °С) наблюдается уменьшение  $S_P/S$ , объясняемое обычно выходом свободных вакансий.

В связи с тем, что медь содержала примеси, часть неравновесных вакансий могла образовывать с ними связанные состояния. Этот эффект приводит к стабилизации вакансий и, следовательно, к повышению температуры их вывода. В интервале температур 100–250 °С виден максимум, природа которого пока остается неясной. Однако важно то, что он проявляется для обоих видов деформации, свидетельствуя об идентичности процессов, происходящих в металле.

Пик  $S_P/S$  при 250 °С обусловлен, по-видимому, кластеризацией сохранившихся связанных дислокаций. Образование вакансионных кластеров наблюдалось при отжиге облученной электронами меди [12]. Последующее падение объясняется рекристаллизацией, происходящей при отжиге образцов, в процессе которой все дефекты, образовавшиеся при деформации, исчезают, и их количество стремится к значению, характерному для хорошо отожженной меди.

Некоторые различия в поведении  $S_P/S$  при отжиге меди, деформированной ударом и прокаткой, все же существуют. Так, в прокатанном образце на начальной стадии отжига медленнее происходит выход вакансий и, как следствие, несколько выше пик, обусловленный их кластеризацией. С другой стороны, в образце, деформированном ударом, замедлена рекристаллизация.

Таким образом, результаты представленные выше, свидетельствуют о том, что каких-либо принципиальных особенностей процесса образования вакансий при импульсной ударной

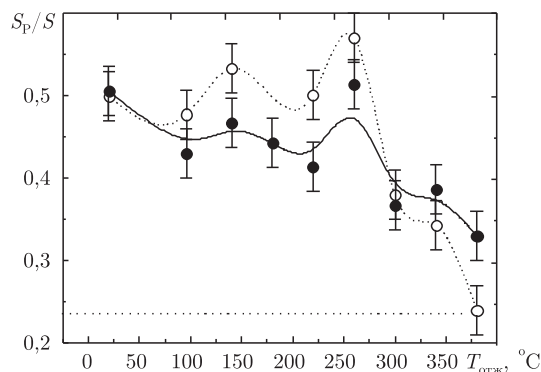


Рис. 3. Изменение параметра  $S_p/S$  в результате ступенчатого изохронного отжига для образцов меди после импульсного сжатия (●) и деформированных прокаткой (○)

обработке не наблюдается. Как следует из результатов, полученных методом позитронной спектроскопии, образование вакансий при ударном нагружении и прокатке идет одинаково. В то же время в первом случае наблюдается ускоренный массоперенос на микроны и десятки микрон за доли секунды, тогда как при прокатке этот эффект не наблюдается. Следовательно, вакансии не могут быть ответственными за аномальный массоперенос, происходящий в металлах в условиях импульсной ударной обработки.

1. Лариков Л. Н., Фальченко В. М., Мазанко В. Ф. и др // Автомат. сварка. – 1974. – № 5. – С. 19.
2. Герцижен Д. С., Мазанко В. Ф., Тышкевич В. М., Фальченко В. М., Массоперенос в металлах при низких температурах в условиях внешних воздействий. – Киев: РИО ИМФ, 1999. – 435 с.
3. Немошкаленко В. В., Арсенюк В. В., Мазанко В. Ф. и др. Общие закономерности массопереноса при различных видах импульсного нагружения // Доп. НАН України. – 2002. – № 10. – С. 76–79.
4. Миронов В. М., Мазанко В. Ф., Герцижен Д. С., Филатов А. В. Массоперенос и фазообразование в металлах при импульсных воздействиях. – Самара: Самарский ун-т, 2001. – 232 с.
5. А. С. 404508 СССР, МКИ В 23 К 20/00. Способ сварки давлением / А. И. Игнатенко, Г. К. Харченко. Оpubл. 14.12.73. Бюл. 44.
6. Грузин П. Л. Применение искусственных радиоактивных индикаторов для изучения процессов диффузии и самодиффузии // ДАН СССР. – 1952. – **86**, № 2. – С. 289–292.
7. Лариков Л. Н., Носарь А. И., Мазанко В. Ф., Фальченко В. М. Диффузия в твердом теле с учетом изменения его размеров // Укр. физ. журн. – 1977. – № 9. – С. 1516–1519.
8. Михаленков В. С. Диагностика вакансионных кластеров в металлах методом электронно-позитронной аннигиляции (обзор) // Металлофизика. – 1983. – **5**, № 6. – С. 44–60.
9. Адаменко А. А., Дехтяр И. Я., Михаленков В. С. Влияние деформации на угловое распределение аннигиляционных квантов в сплавах никеля и меди // Изд-во АН СССР. – 1967. – **173**, № 6. – С. 1291.
10. Михаленков В. С. Электрон-позитронная аннигиляция в металлах с несовершенной кристаллической структурой: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07 / Ин-т металлофиз. АН УССР. – Киев, 1981. – 45 с.
11. Зворыкин Л. О., Румянцев Б. В., Фальченко В. М., Филатов А. В. Влияние остаточной деформации на массоперенос никеля в меди при прохождении ударных волн // Металлофизика. – 1987. – **9**, № 4. – С. 110.
12. Lengeler B., Mantl S., Triftshausen W. Interaction of hydrogen and vacancies in Cu investigated by position annihilation // J. Phys. F: Metal Phys. – 1978. – **8**, No 8. – P. 1691.

Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова  
НАН Украины, Киев

Поступило в редакцию 28.12.2006