

ВЛИЯНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ВНУТРЕНнюю МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕЛКОЗЕРНИСТОЙ МЕДИ

О. Н. Игнатова¹, И. И. Каганова¹, А. Н. Малышев¹, А. М. Подурец¹,
В. А. Раевский¹, В. И. Скоков¹, М. И. Ткаченко¹, Г. А. Салищев²,
Т. Н. Конькова²

¹РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров, root@gdd.vniief.ru

²Белгородский государственный университет, 308015 Белгород, gensal@mail.ru

Показано, что предварительное нагружение мелкозернистой меди с размером зерна 0.5 мкм ударной волной интенсивностью $\approx 25 \div 50$ ГПа не приводит к изменениям ее внутренней микроструктуры и механических свойств, плотность дислокаций незначительно возрастает с $1.8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ в исходном состоянии до $(3.1 \div 3.6) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ после ударно-волнового нагружения. Увеличение интенсивности ударной волны до давлений >55 ГПа приводит к уменьшению плотности дислокаций до $2.5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$, увеличению размера зерна до ≈ 19 мкм, появлению внутри зерен микродвойников и уменьшению механических свойств мелкозернистой меди до уровня крупнокристаллической.

Ключевые слова: ударная волна, мелкозернистые металлы, интенсивность нагружения, разупрочнение, условный предел текучести, плотность дислокаций.

ВВЕДЕНИЕ

Ударно-волновое нагружение является уникальным способом создания условий высокого давления и высокой скорости деформации и может использоваться как метод изменения механических свойств, вызывающий изменение структуры [1–4].

В настоящее время наиболее широко исследовано нагружение «крупнозернистых» металлов ударной волной с максимальным давлением ≈ 100 ГПа. Например, в работах [3, 5] проведены исследования механических свойств и микроструктуры крупнокристаллической меди после нагружения давлением до 70 ГПа при различных скоростях деформирования и температурах. Наблюдались значительные структурные изменения в этом металле. Так, для ударных давлений выше определенной пороговой величины (30 ГПа) происходит как гомогенное, так и гетерогенное деформирование. Это выражается в образовании в зернах параллельных слоев шириной $\approx 1 \div 2$ мкм с периодом $1 \div 10$ мкм [5]. Для алюминия аналогичные результаты получены при нагружении

давлением ≈ 10 ГПа [1]. Моделирование этого процесса показало, что формирование гетерогенной структуры в металлах сопровождается значительным повышением температуры в полосах локализованной деформации и кратковременным снижением прочности. Этот локализованный нагрев и снижение прочности происходят за достаточно короткое время $\approx 0.1 \div 0.5$ мкс, после чего температура выравнивается и прочность восстанавливается. Кроме того, предварительное воздействие ударной волны на крупнокристаллическую медь приводит к увеличению ее условного предела текучести в $4 \div 6$ раз, повышению на $\approx 20\%$ сопротивления действию растягивающих напряжений и росту плотности дислокаций на три порядка, до $\approx 10^{11} \text{ см}^{-2}$ [6].

Максимальные прочностные характеристики в настоящее время зафиксированы у металлов с субмелкокристаллической структурой. Возникает вопрос: можно ли, воздействуя ударно-волновым нагружением, изменить структуру мелкозернистых и наноструктурных материалов и улучшить их свойства до такой степени, какая не наблюдается при квазистатическом деформировании? В данной работе рассматривается влияние ударно-волнового нагружения на субмелкокристалли-

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 08-02-0087а, 09-02-97036_поволжье).

ческую медь в сравнении с крупнокристаллической (99.9 % чистоты, размер зерна 110 мкм).

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Высокоинтенсивному ударно-волновому нагружению подвергались образцы ультрамелкозернистой (УМЗ) меди начальной плотности $\rho_0 = 8.93 \text{ г/см}^3$. УМЗ-медь изготовлена с помощью всесторонней изотермическойковки, средний размер ее зерен равен $d_0 = 0.5 \text{ мкм}$ [7], плотность дислокаций составляет $\rho_d = 1.8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

Нагружение осуществлялось стальным ударником (сталь марки 12Х18Н10Т), который ускорялся продуктами взрыва до скорости $\approx 2.5 \text{ км/с}$ и тормозился об исследуемые медные образцы (№ 1–4), собранные в пакет, состоящий из четырех дисков. Образцы запрессованы в медные обоймы (медь М1), которые предохраняют от воздействия растягивающих напряжений, возникающих при боковых разгрузках. Нижний медный сплошной диск предохраняет образцы от откола. Схема нагружения показана на рис. 1. В данной постановке проведено также нагружение крупнокристаллической меди.

По одномерной расчетной методике, учитывающей упруговязкопластические свойства материалов [8], выполнено численное моделирование волновых процессов, реализующихся в сборке. На рис. 2 и 3 показаны зависимости амплитуды ударной волны от времени, профили

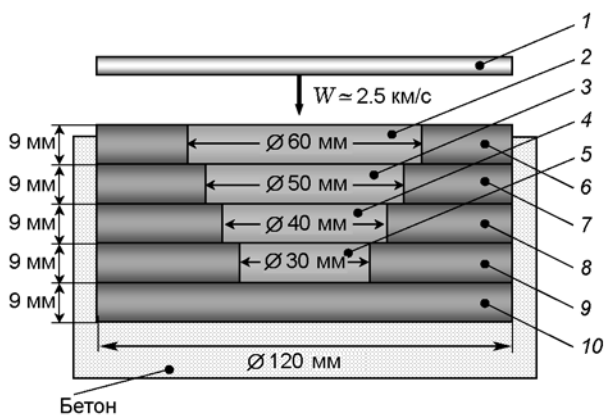


Рис. 1. Схема экспериментов по ударно-волновому нагружению образцов различной интенсивности:

1 — стальной ударник (сталь 12Х18Н10Т, толщина $h = 1 \text{ мм}$), 2–5 — медные образцы (№ 1–4), 6–9 — медные обоймы, 10 — медная подложка

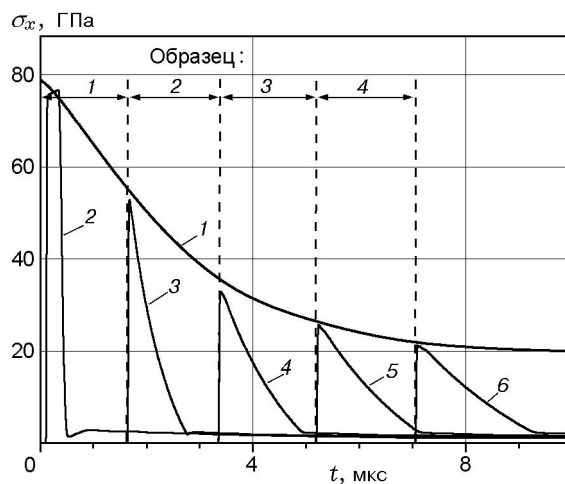


Рис. 2. Зависимость амплитуды ударной волны от времени (1) и расчетные профили напряжений (2–5) в образцах № 1–4 и в исходном состоянии

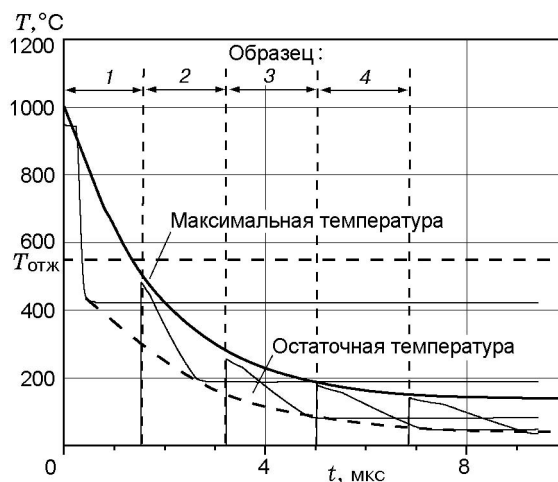


Рис. 3. Зависимости температуры от времени во фронте ударной волны и волне разгрузки в образцах № 1–4

напряжений и температуры (на фронте ударной волны и в волне разгрузки), реализующиеся в образцах № 1–4. Далее по тексту образцы обозначаются номерами № 1–4 согласно их расположению в сборке — от максимального до минимального нагружения. Отметим, что в образце № 1 во фронте ударной волны реализуются высокие напряжения $\sigma_x = 75 \div 55 \text{ ГПа}$ и температуры $T = 1000 \div 550 \text{ }^\circ\text{C}$, превышающие температуру отжига в микросекундном диапазоне времени ($1 \div 1.5 \text{ мкс}$).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Внутренняя микроструктура УМЗ-меди после нагружения

Микроструктуру образцов УМЗ-меди исследовали на растровом электронном микроскопе Quanta 200 3D. Предварительно подготовленный образец, наклоненный под углом 70° к горизонтали, сканировался электронным пучком с ускоряющим напряжением 30 кВ. Используемая программа TSL OIM Analysis 5 по картине дифракции обратнорассеянных электронов восстанавливает кристаллографическую ориентацию в каждой точке сканированного участка. Обработка данных при помощи программы TSL OIM Analysis 5 позволяет получить изображение зеренной структуры материала, распределение зерен по размерам и их разориентировку, а также определить наличие малоугловых и высокоугловых границ и наличие текстуры в области сканирования.

На рис. 4 показана микроструктура образца № 1 после нагружения давлением $75 \div 55$ ГПа. Видно, что микроструктура образца № 1 неоднородна по размеру зерен, который варьирует в интервале $d = 1 \div 19$ мкм, большей частью — $d = 6 \div 12$ мкм. Границы зерен искривлены и имеют преимущественно вы-

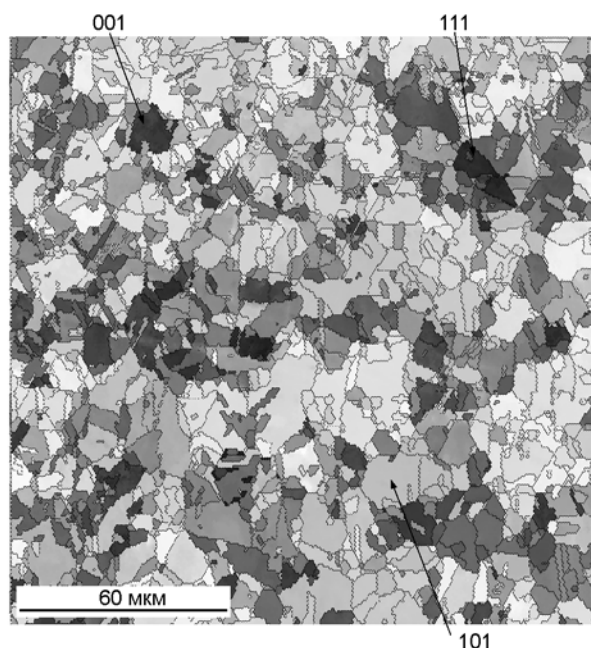


Рис. 4. Микроструктура образца № 1 УМЗ-меди после нагружения давлением $p \approx 55 \div 75$ ГПа

сокоугловую разориентировку. Внутри некоторых крупных зерен обнаружены двойники, образовавшиеся в ходе деформации. Количество двойников в структуре невелико. Высокоугловые границы составляют $\approx 95\%$ от всего количества распознанных границ.

Микроструктура образцов № 2–4 мелкозернистая и весьма однородная, размер зерен практически не изменяется по сравнению с исходным состоянием. Зерна имеют равноосную форму с несколько искривленными границами. Доля малоугловых границ в микроструктурах образцов № 2–4 заметно выросла по сравнению с образцом № 1 и составляет $35 \div 38\%$. Двойников деформации в зернах образцов не обнаружено. В то же время в крупнокристаллической меди при ее нагружении давлением $20 \div 50$ ГПа объемная доля двойников составляет $\approx 10 \div 15\%$ [9].

Пороговое значение давления, при котором начинают появляться деформационные двойники в УМЗ-меди, равно ≈ 55 ГПа.

2.2. Измерение плотности дислокаций

Использование рентгеноструктурного метода [10] позволило определить изменение плотности дислокаций по профилю дифракционных линий в зависимости от давления сохраненных после нагружения образцов. Начальная плотность дислокаций в УМЗ-меди составляет $\rho_d = 1.8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, что на три порядка выше плотности в исходном крупнокристаллическом состоянии после отжига $\rho_d \approx 10^8 \text{ см}^{-2}$. Результаты измерений приведены в таблице и на рис. 5. Полная деформация при ударно-волновом нагружении рассчитывается по сжатию металла: $\varepsilon_i = \frac{3}{4} \ln \delta = \frac{4}{3} \ln \frac{\rho}{\rho_0}$ ($\delta = \rho/\rho_0$, где ρ_0 , ρ — соответственно начальная плотность меди и плотность при ее ударно-волновом нагружении).

Плотность дислокаций в УМЗ-меди после нагружения ее ударными волнами различной интенсивности

Номер образца	$\rho, 10^{10} \text{ см}^{-2}$	$p, \text{ ГПа,}$	ε_i
1	0.25	$75 \div 55$	0.38
2	31.0	$55 \div 35$	0.32
3	32.6	$35 \div 30$	0.24
4	22.8	$30 \div 25$	0.20

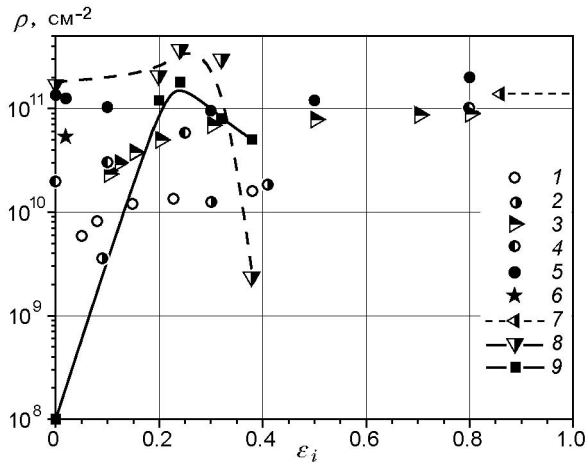


Рис. 5. Зависимость плотности дислокаций в меди с различным размером зерен от степени деформации (эксперимент и сравнение с литературными данными):

1 — $d_0 = 150$ мкм [2], 2 — $d_0 = 20$ мкм [2], 3 — single crystal [11], 4 — медь OFHC, $d_0 = 500 \div 2000$ мкм [12], 5 — УМЗ-медь, $d_0 = 200$ нм [13], 6 — УМЗ-медь, $d_0 = 100 \div 200$ нм [14], 7 — УМЗ-медь [15], 8 — УМЗ-медь, данная работа, 9 — крупнокристаллическая медь, данная работа

Как видно из рис. 5, в УМЗ-меди, обладающей наибольшей исходной плотностью дислокаций, после нагружения давлением $30 \div 50$ ГПа плотность дислокаций возрастает в ≈ 2 раза. Далее она падает до $\rho_d \approx 2.5 \cdot 10^9$ см $^{-2}$, что, вероятнее всего, связано с отжигом дефектов при адиабатическом нагреве в результате ударно-волнового нагружения.

Аналогичные измерения проведены для крупнокристаллической меди. Ударно-волновое нагружение генерирует в крупнокристаллической меди большую плотность дислокаций, чем квазистатическая деформация. Из рис. 5 видно, что при нагружении крупнокристаллической меди давлением $75 \div 55$ ГПа происходит отжиг дислокаций до значений $\rho_d \approx 5 \cdot 10^{10}$ см $^{-2}$, что на порядок выше, чем в УМЗ-меди. Возможно, это связано с разной динамикой наработки дислокаций и температурного отжига при нагружении.

2.3. Механические свойства УМЗ-меди до и после воздействия ударной волны

Исследование образцов УМЗ-меди в исходном состоянии и после нагружения ударной волной проводили как при статическом, так и

при динамическом сжатии.

Статические испытания образцов при комнатной температуре выполняли на универсальной испытательной установке INSTRON модели 1185 в приспособлении на сжатие A0706-П798 со скоростью перемещения траверсы машины 0.4 мм/мин, что соответствует скорости деформации $1.3 \cdot 10^3$ с $^{-1}$. Для каждого типа образцов проведено по 4 \div 6 экспериментов. На рис. 6 показаны средние истинные σ - ε -диаграммы статического сжатия при нормальной температуре для УМЗ-меди в исходном состоянии и после нагружения ударными волнами различной интенсивности. Диаграммы построены с учетом полной, накопленной при нагружении деформации. Для сравнения на рисунке приведены σ - ε -диаграммы статического сжатия крупнокристаллической отожженной меди М1 в исходном состоянии и после воздействия ударных волн различной интенсивности. Условные пределы текучести ($\sigma_{-0.2}$) УМЗ-меди до и после нагружения, полученные из диаграмм на рис. 6, равны соответственно $\sigma_{-0.2} = 416$ МПа в исходном состоянии и $\sigma_{-0.2} = 430 \div 400$ МПа после воздействия ударной волны интенсивностью $\approx 25 \div 55$ ГПа. С увеличением интенсивности

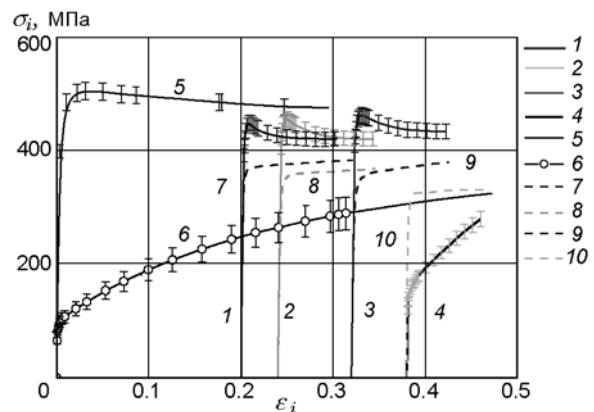


Рис. 6. σ - ε -Диаграммы статического сжатия при нормальной температуре УМЗ-меди и крупнокристаллической меди до и после нагружения ударными волнами различной интенсивности:

УМЗ-медь после нагружения: 1 — $\sigma_x \approx 30 \div 25$ ГПа, 2 — $\sigma_x \approx 38 \div 30$ ГПа, 3 — $\sigma_x \approx 55 \div 38$ ГПа, 4 — $\sigma_x \approx 75 \div 55$ ГПа; 5 — УМЗ-медь в исходном состоянии; 6 — крупнокристаллическая медь в исходном состоянии; 7-10 — крупнокристаллическая медь после ударно-волнового нагружения давлением $75 \div 25$ ГПа

до $55 \div 75$ ГПа условный предел текучести уменьшался до $\sigma_{-0.2} \approx 190$ МПа, что связано, вероятно, с отжигом металла при таких режимах нагружения.

Исследование механических свойств при динамическом сжатии проведено методом цилиндров Тейлора [16]. Для определения динамического предела текучести (Y) Тейлор предложил простой метод, в котором конечная длина цилиндра L_f после соударения с жесткой преградой со скоростью W_0 служит для определения динамического предела текучести исследуемого материала. Метод Тейлора позволяет реализовать скорости деформации в интервале $\approx 10^3 \div 10^5$ с⁻¹. На рис. 7 показаны зависимости относительного изменения конечной длины цилиндров (L_f / L_0) от скорости соударения (W_0). Начальные размеры цилиндров: длина $L_0 = 25$ мм, диаметр $D_0 = 5$ мм. Из рис. 7 видно, что при $W_0 = 100 \div 300$ м/с значения L_f / L_0 для УМЗ-меди на 20 % выше, чем для крупнокристаллической. Сделать оценки динамического предела текучести можно, используя известную формулу $\frac{L_f}{L_0} = \exp\left(-\frac{\rho_0 W_0^2}{2Y}\right)$. Однако более точное определение динамического предела текучести по экспериментальным дан-

ным метода Тейлора можно получить при адекватном описании геометрии цилиндров методами численного моделирования путем решения двумерной задачи с заданием реалистичных прочностных свойств материала стержней.

Значения L_f / L_0 УМЗ-меди после нагружения до давлений $\approx 25 \div 55$ ГПа в пределах экспериментальной погрешности близки к L_f / L_0 исходной, ненагруженной УМЗ-меди. При возрастании интенсивности ударной волны до $\approx 55 \div 75$ ГПа величины L_f / L_0 уменьшаются до значений, характерных для крупнокристаллической меди.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Нагружение УМЗ-меди ударной волной интенсивностью $\approx 25 \div 50$ ГПа не изменяет ее внутреннюю микроструктуру и механические свойства.

- Нагружение УМЗ-меди ударной волной интенсивностью > 55 ГПа приводит к уменьшению на два порядка плотности дислокаций, увеличению размера зерна до ≈ 19 мкм, появлению внутри зерен микродвойников и уменьшению механических свойств, которые близки к аналогичным характеристикам крупнокристаллической меди в отожженном состоянии.

- Ударно-волновое воздействие на отожженную крупнокристаллическую медь увеличивает ее предел текучести в 4–5 раз и повышает плотность дислокаций с 10^8 до $5 \cdot 10^{10}$ см⁻².

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов** / под ред. М. А. Мейерса и Л. Е. Мурра. — М.: Металлургия, 1984. — С. 110.
2. **Эпштейн Г. Н.** Строение металлов, деформированных взрывом. — М.: Металлургия, 1988.
3. **Salishew G. A., Raevskiy V. A., Ignatova O. N., Zocher M., et al.** Influence of intensive plastic strain and shock-wave loading on copper strength // Intern. Conf. «New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes in Condensed Matter», Dijon, France, 9–14 April 2006. — P. 17.
4. **Petit J., Dequiedt J.-L.** Constitutive relations for copper with two mechanisms including twinning for a use under shock wave loading // J. Phys. IV. France. — 2003. — V. 110.
5. **Raevsky V. A.** Heterogeneous deformation of copper in shock waves at subgrain scale level // 14th APS Total Conf. on Shock Compression of Condensed Matter. — 2005. — V. 50, N 5.

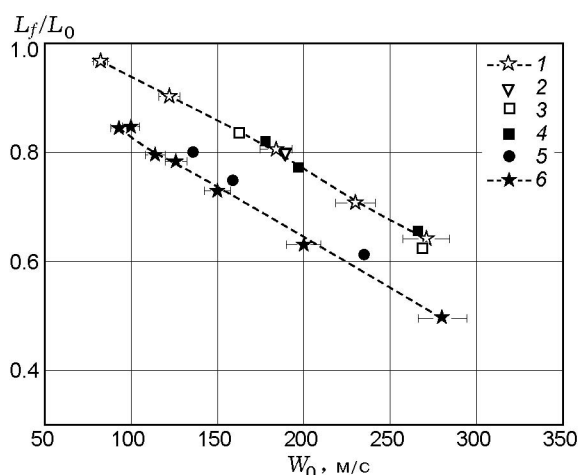


Рис. 7. Зависимости относительного изменения длины цилиндров УМЗ-меди от скорости их соударения с жесткой преградой до и после ударно-волнового нагружения, а также цилиндров крупнокристаллической меди М1:

1 — УМЗ-медь в исходном состоянии; 2–5 — УМЗ-медь после нагружения: 2 — $\sigma_x \approx 30 \div 25$ ГПа, 3 — $\sigma_x \approx 38 \div 30$ ГПа, 4 — $\sigma_x \approx 55 \div 38$ ГПа, 5 — $\sigma_x \approx 75 \div 55$ ГПа, 6 — крупнокристаллическая медь в исходном состоянии

6. Раевский В. А., Подурец А. М., Игнатова О. Н. и др. Влияние высокоскоростного нагружения на микроструктуру и динамические свойства меди // Труды междунар. конф. «IX Харитоновские научные чтения». — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007.
7. Жеребцов С. В., Галеев Р. М., Валиахметов О. Р., Малышева С. П., Салищев Г. А., Мышляев М. М. Формирование субмикроструктурной структуры в титановых сплавах интенсивной пластической деформацией и их механические свойства // Кузнечно-штамповочное про-во. — 1999. — № 7. — С. 17–22.
8. Гаврилов Н. Ф., Иванова Г. Г., Селин В. И., Софронов В. Н. Программа УПОК для решения одномерных задач механики сплошной среды в одномерном комплексе // Вопросы атом. науки и техники. — 1982. — Вып. 3 (11). — С. 11–14.
9. Раевский В. А., Подурец А. М., Ханжин В. Г. и др. Двойниковые структуры в меди после ударного и безударного высокоскоростного нагружения // Труды междунар. конф. «IX Харитоновские научные чтения». — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007.
10. Уманский Я. С., Скаков Ю. А., Иванов А. Н., Расторгуев Л. Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. — М., 1982.
11. Haberjahn M., Klimanek P., Motylenko M. Substructure development in cold rolled copper single crystals // Materials Sci. and Eng. A. — 2002. — V. 324. — P. 196–199.
12. Zehetbauer M., Ungar T., et al. Scanning X-ray diffraction peak profile analysis in deformed Cu-polycrystals by synchrotron radiation // Acta Materialia. — 1999. — V. 47. — P. 1053–1061.
13. Koneva N. A., Kozlov E. V., et al. Substructural and phase transformations during plastic deformations of materials obtained by intensive deformation // Materials Sci. and Eng. A. — 2005. — V. 410-411. — P. 341–344.
14. Валиев Р. З., Александров И. В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. — М.: Логос, 2000.
15. Schafner E., Steiner G., et al. Lattice defect investigation of ECAP-Cu by means of X-ray line profile analysis, calorimetry and electrical resistometry // Material Sci. and Eng. A. — 2005. — V. 410-411. — P. 169–173.
16. Taylor J. The testing of materials at high rates of loading // J. Inst. of Civil, Eng. — 1946.

*Поступила в редакцию 20/XI 2009 г.,
в окончательном варианте — 4/V 2010 г.*