

PACS: 61.72.Mm, 62.20.Fe, 62.20.Qp, 81.40.Ef, 81.40.Lm

Л.Ф. Сенникова, В.М. Ткаченко, А.Н. Гангало, Т.Т. Мороз

## ВЛИЯНИЕ РАЗНЫХ СХЕМ КОМБИНИРОВАННОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕДИ МАРКИ М06

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

Статья поступила редакцию 19 февраля 2020 года

*Изучены физико-механические свойства меди марки М06 после деформации разными схемами комбинированной обработки, включающими равноканальное угловое прессование (РКУП) и один из методов традиционной обработки (осадка, прокатка, волочение). Показано, что применение комбинированной обработки позволяет достичь более высокого комплекса физических и механических свойств материала по сравнению с традиционными технологиями. Определено влияние дефектообразования (поры и микротрещины), вносимого при деформационной обработке, на механические и физические свойства материала.*

**Ключевые слова:** медь, равноканальное угловое прессование, твердость, плотность, осадка, прокатка, волочение, поры, микротрещины, проволока

### Введение

Одним из направлений современного материаловедения является создание объемных наноструктурированных материалов. Получили развитие технологии интенсивной пластической деформации (ИПД) по трансформации исходной крупнокристаллической структуры в ультрамелкозернистую [1,2]. Они основаны на большой пластической деформации материалов (в основном путем простого сдвига) под давлением. В результате ИПД в металлических материалах формируется ультрамелкозернистая структура с большой (более 65–70%) долей высокоугловых границ [1–3], являющихся определяющим объектом наномасштаба. Благодаря этому обстоятельству у материалов существенно повышается уровень физико-механических свойств [1,2].

Наиболее известным методом ИПД является РКУП [4]. Этот метод позволяет накапливать в материале большие степени деформации и тем самым способствует интенсивному измельчению зеренной структуры и формированию высоких свойств материала. Однако накопление больших значений суммарной деформации приводит к появлению деформационных повреждений в обрабатываемом материале. По общепринятым представлениям, разрушению металла предшествует образование в его структуре дефектов в виде микро- и макронарушений целостности. Микроскопические поры и тре-

щины образуются в процессе пластической деформации твердых тел или вследствие технологических особенностей получения последних. Как правило, увеличение деформационной пористости ведет к деградации физико-механических характеристик материалов [5].

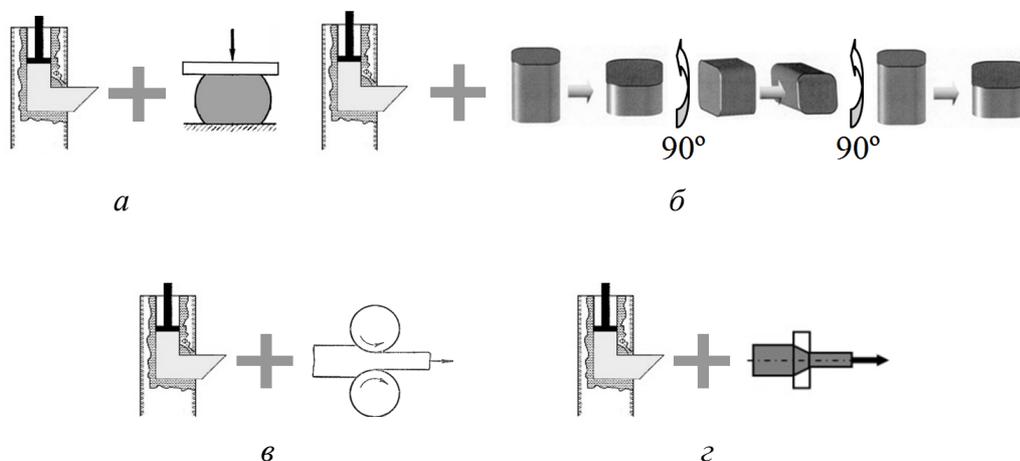
Поэтому при создании новых перспективных материалов методами ИПД актуальной задачей является разработка методик обработки металлов, которые позволяют, с одной стороны, формировать ультрамелкозернистую структуру, обеспечивающую материалу высокий комплекс физико-механических свойств, а с другой – вносить как можно меньше деформационных повреждений в виде пор и микротрещин, ухудшающих эти свойства.

Цель настоящей работы заключалась в определении влияния различных схем комбинированной пластической деформации на физико-механические свойства меди М0б и эволюцию дефектной структуры (поры, микротрещины).

### Материал и методы исследования

Исходным материалом для исследований служил промышленный горячепрессованный пруток меди марки М0б диаметром 50 mm, который прессовали до диаметра 20 mm. Полученные заготовки отжигали при температуре 600°C в течение 2 h.

Комбинированная пластическая деформация заключалась в последовательной обработке заготовок методом РКУП и одним из традиционных методов обработки (прокатка, осадка, волочение). Процесс РКУП осуществляли при комнатной температуре с использованием контейнеров с углом пересекающихся каналов  $\theta = 90$  и  $160^\circ$ . Цилиндрические медные заготовки проходили через каналы деформирующей матрицы от 1 до 30 раз с поворотом заготовки на  $180^\circ$  после каждого прохода. В случае использования деформирующей матрицы с углом  $\theta = 90^\circ$  разовая эквивалентная деформация за один цикл прессования  $e = 1$ , при  $\theta = 160^\circ e = 0.2$ .



**Рис. 1.** Схемы комбинированной пластической деформации: *а* – РКУП + осадка, *б* – РКУП + мультисадка, *в* – РКУП + прокатка, *г* – РКУП + волочение

На рис. 1 представлены различные схемы комбинированной пластической деформации, которые включают РКУП ( $\Sigma e = 6$ ) в сочетании с:

- а) осадкой в одном направлении, параллельном оси РКУП (степень деформации при осадке  $e = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ );
- б) осадкой в трех взаимно перпендикулярных направлениях ( $e = 0.2, 0.6, 1.0$ );
- в) прокаткой в перпендикулярном к оси РКУП направлении ( $e = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ );
- г) волочением в параллельном к оси РКУП направлении ( $e = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 5.0$ ).

Термическую обработку образцов проводили в лабораторной печи СНОЛ-7.2/1100.

Дефектную структуру (микропоры, микротрещины) и физико-механические свойства образцов в исходном состоянии и после деформации анализировали методами дюрOMETрических (твердомер Виккерса HV-5) и волюметрических (весы SHIMADZU) исследований, а также механических испытаний на растяжение (деформационная машина 2167-P50) в соответствии с ГОСТ 10446-80. Электрическое сопротивление измеряли на проволочных образцах диаметром 0.5 mm при комнатной температуре 4-зондовым методом на постоянном токе.

### Результаты и их обсуждение

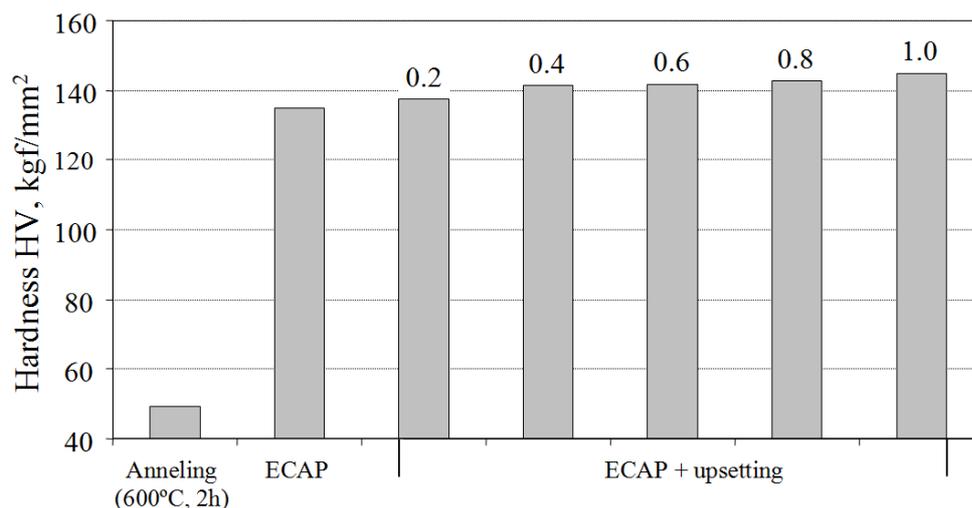
В результате проведенных исследований влияния различных схем комбинированной пластической деформации на деформационную поврежденность и физико-механические свойства меди были детально изучены закономерности изменения прочностных свойств и развитие микронесплошностей материала с увеличением степени накопленной деформации для вышеуказанных схем комбинированной обработки.

Сравнительный анализ влияния степени накопленной деформации на изменения значений твердости меди показал, что для всех схем комбинированной деформации наблюдаются одинаковые закономерности. В качестве примера на рис. 2 приведены графики изменения твердости для комбинированных обработок РКУП + осадка и РКУП + мультиосадка. Для остальных схем комбинированной деформации зависимости имеют аналогичный характер. На первом этапе деформация РКУП приводит к увеличению твердости материала примерно в 2 раза по сравнению с отожженным состоянием. Далее, независимо от схемы традиционной обработки (прокатка, осадка, волочение), происходит дальнейший рост твердости на 10–15% по сравнению с РКУП.

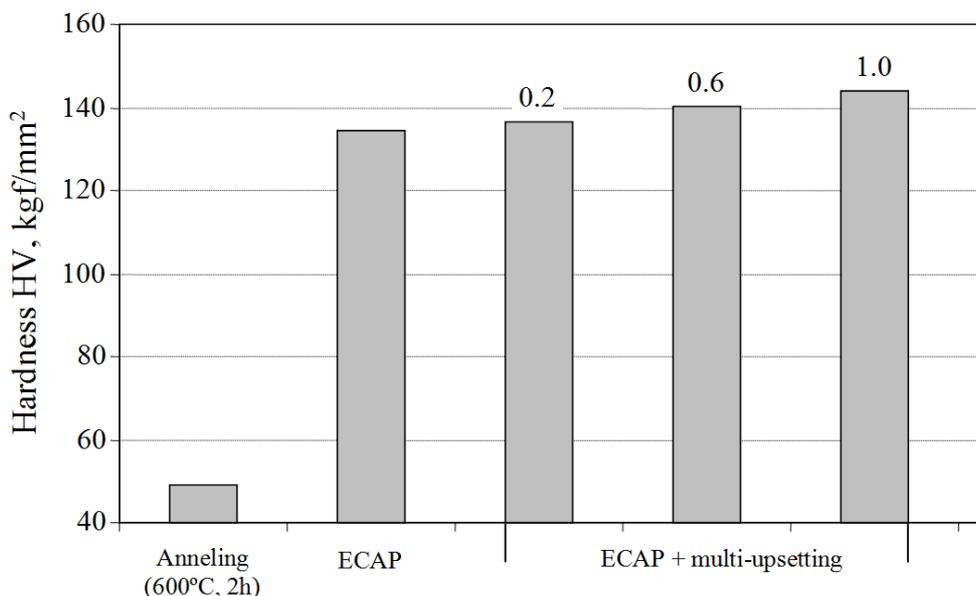
Полученные результаты показали, что различные схемы комбинированной пластической деформации по-разному влияют на плотность материала (рис. 3).

Для всех видов обработки на этапе проведения РКУП вследствие внесения большого количества дефектов в виде дислокаций, пор и микротрещин происходит уменьшение плотности меди по сравнению с отожженным материалом. Относительное разуплотнение при РКУП  $\Delta\rho/\rho_0 = 5.78 \cdot 10^{-3}$ .

В случаях комбинированной обработки по схемам РКУП + осадка и РКУП + мультиосадка (рис. 3, а, б) наблюдается рост плотности уже на на-



*a*



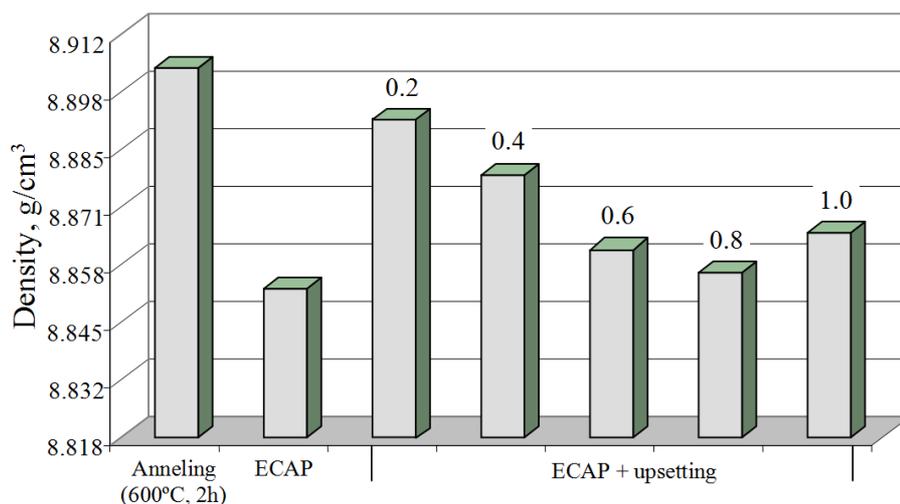
*б*

**Рис. 2.** Зависимость твердости меди от степени деформации для разных схем комбинированной обработки: *a* – РКУП + осадка, *б* – РКУП + мультиосадка; цифры над столбиками – значения степени деформации  $e$

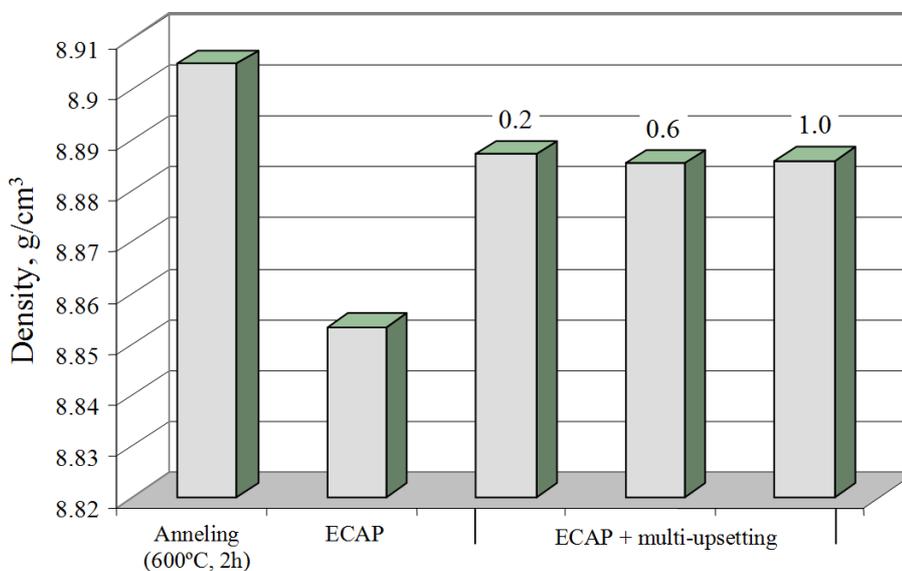
чальных этапах осадки при  $e = 0.2$ . В этих двух случаях реализуется схема напряженного состояния путем всестороннего сжатия, что сопровождается интенсивным залечиванием пор и микротрещин, сформированных на этапе РКУП. Относительное разуплотнение на данном этапе обработки уменьшается до  $\Delta\rho/\rho_0 = 1.98 \cdot 10^{-3}$ . Дальнейшее увеличение степени деформации в случае РКУП + осадка приводит к некоторому падению плотности за счет образования новых микродефектов, формирующихся в процессе одноосной осадки. Относительное разуплотнение при этом увеличивается до значения  $\Delta\rho/\rho_0 = 3.64 \cdot 10^{-3}$ . В случае РКУП + мультиосадка дальнейший рост степени

деформации практически не оказывает влияния на значения плотности материала. Относительное разуплотнение  $\Delta\rho/\rho_0 = 2.12 \cdot 10^{-3}$ , что свидетельствует о небольшом приросте микродефектов во время всесторонней осадки.

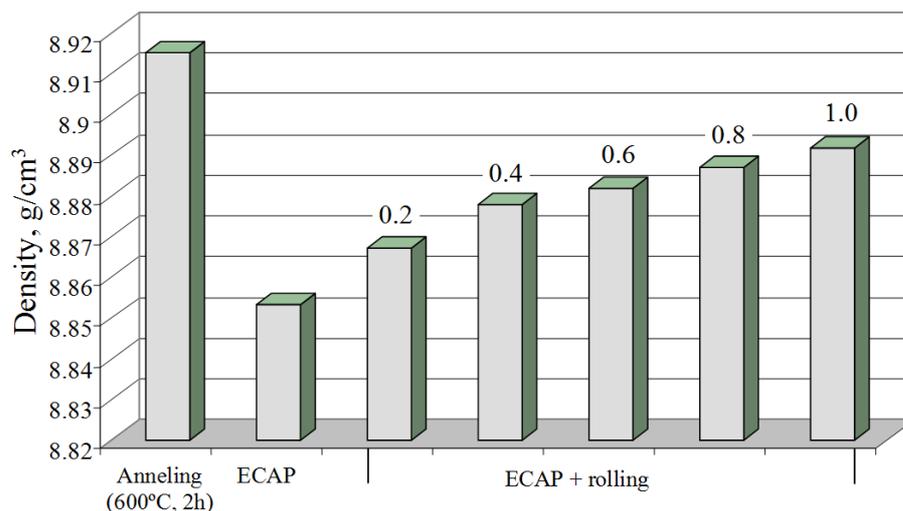
Изменения плотности меди при комбинированных обработках РКУП + прокатка и РКУП + волочение имеют сходный характер (рис. 3, в, г). В случае РКУП + прокатка реализуется схема напряженного состояния путем неравномерного всестороннего сжатия, а в случае РКУП + волочение – схема с двумя сжимающими и одним растягивающим напряжениями. При воздействии этими комбинированными методами увеличение значений плотности материала происходит постепенно. На ранних этапах ( $e = 0.2$ ) традиционной обработки (прокатка, волочение) плотность повышается незначительно, что свидетельствует о начальной стадии развития процесса залечивания микродефектов. С увеличением степени деформации до  $\Sigma e = 1.0$  наблюдается рост



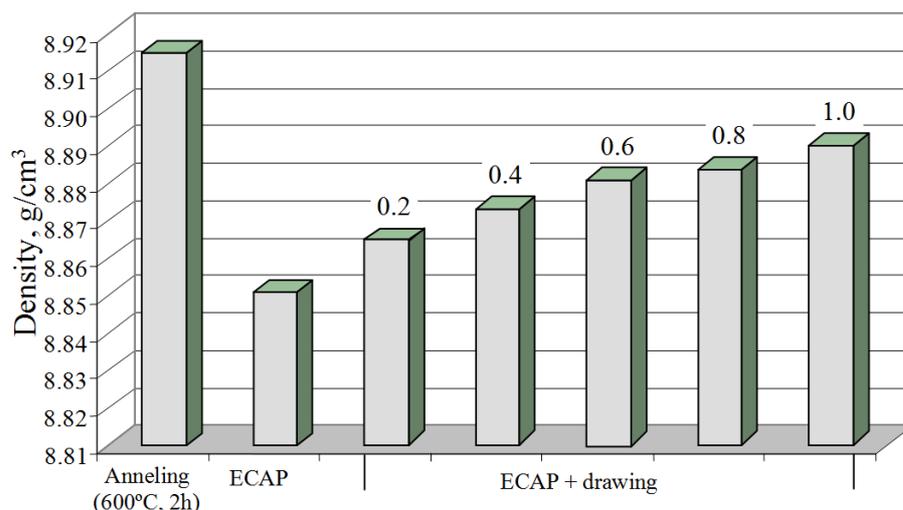
a



б



а



б

**Рис. 3.** Зависимость плотности меди от степени деформации для разных схем комбинированной обработки: *а* – РКУП + осадка, *б* – РКУП + мультисадка, *в* – РКУП + прокатка, *г* – РКУП + волочение

значений плотности (относительное разуплотнение для обеих схем обработки снижается до значения  $\rho/\rho_0 = 2.61 \cdot 10^{-3}$ ), что связано с интенсивным развитием процессов залечивания микродефектов, образованных на стадии РКУП.

Для установления влияния различных схем РКУП с последующим волочением на физико-механические свойства медной проволоки проведены исследования механических (рис. 4) и электрических (таблица) свойств медной проволоки марки М0б диаметром 0.5 mm, полученной по традиционной технологии и с помощью комбинированной обработки.

Традиционная технология гидроэкструзия (ГЭ) + волочение заключалась в проведении ГЭ до степени деформации  $\Sigma e = 4$  и последующего волочения с  $\Sigma e = 6$ .

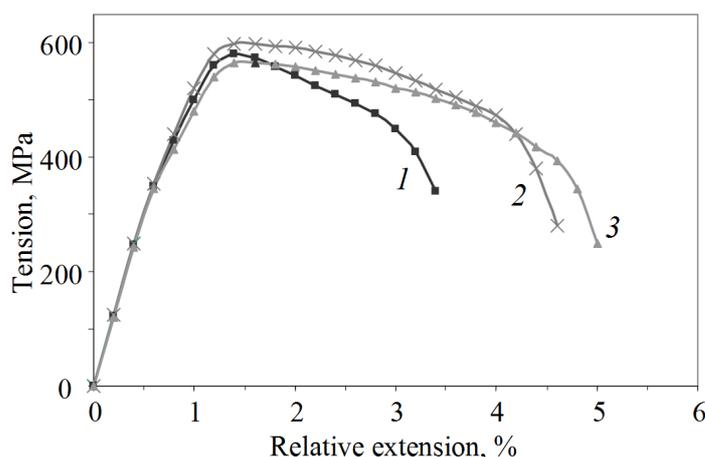


Рис. 4. Диаграммы испытаний на растяжение для разных схем деформационной обработки: 1 – ГЭ + волочение, 2 – РКУП\_90 + волочение, 3 – РКУП\_160 + волочение

Таблица

Физико-механические свойства медной проволоки диаметром 0.5 mm после разных видов обработки

| Вид обработки        | R, $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ | $\sigma_{0.2}$ | $\sigma_0$ | $\delta$ , % |
|----------------------|--------------------------------|----------------|------------|--------------|
|                      |                                | МПа            |            |              |
| Отжиг (600°C, 2 h)   | 1.70                           | 90             | 202        | 54           |
| ГЭ + волочение       | 1.89                           | 558            | 581        | 2.7          |
| РКУП_90 + волочение  | 2.01                           | 567            | 596        | 4.1          |
| РКУП_160 + волочение | 1.76                           | 551            | 566        | 4.6          |

Комбинируемую обработку осуществляли сочетанием РКУП с последующим волочением по двум режимам. В первом режиме РКУП проводили в контейнере с углом пересечения каналов  $\theta = 90^\circ$  (РКУП\_90 + волочение), во втором режиме – с углом пересечения каналов  $\theta = 160^\circ$  (РКУП\_160 + волочение).

Использование традиционной технологии ГЭ + волочение приводит к формированию в материале высоких прочностных свойств (предел текучести  $\sigma_{0.2} = 558$  МПа, предел прочности  $\sigma_b = 581$  МПа), при этом пластические свойства резко снижаются (относительное удлинение  $\delta = 2.7\%$ ). Электропроводность материала также снижается (удельное электросопротивление  $R = 1.89 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) по сравнению к отожженным состоянием меди.

Вследствие комбинированной обработки РКУП\_90 + волочение в материале формируются более высокие прочностные ( $\sigma_{0.2} = 567$  МПа,  $\sigma_b = 596$  МПа) и пластические ( $\delta = 4.1\%$ ) свойства по сравнению с традиционной технологией. При этом электрические свойства незначительно ухудшаются ( $R = 2.01 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ).

Использование комбинированной обработки РКУП\_160 + волочение с менее жесткой схемой РКУП позволяет достичь более высоких показателей пластических и электрических свойств. Относительное удлинение увеличивается до  $\delta = 4.6\%$ , удельное электросопротивление снижается до  $R = 1.76 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ . Достижение таких свойств удается за счет того, что на этапе проведения РКУП в менее жестком режиме обработки в материал вносится меньше деформационных повреждений в виде пор и микротрещин, неблагоприятно влияющих на пластические и электрические свойства материала.

### Заключение

Показано, что применение комбинированной обработки, включающей РКУП и один из методов традиционной обработки (осадка, прокатка, волочение), позволяет достичь более высокого комплекса физических и механических свойств материала по сравнению с традиционными технологиями.

Установлено влияние дефектообразования (поры и микротрещины), вносимого при деформационной обработке, на механические и физические свойства материала.

1. R.Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T.G. Langdon, M.J. Zehetbauer, Y.T. Zhu, JOM **68**, 1216 (2016).
2. Y. Estrin, A. Vinogradov, Acta Mater. **61**, 782 (2013).
3. В.В. Рыбин, Большие пластические деформации и разрушение металлов, Металлургия, Москва (1986).
4. R.Z. Valiev, T.G. Langdon, Prog. Mater. Sci. **51**, 881 (2006).
5. П.Г. Черемской, В.В. Слезов, В.И. Бетехтин, Поры в твердом теле, Энергоатомиздат, Москва (1990).

L.F. Sennikova, V.M. Tkatchenko, A.N. Gangalo, T.T. Moroz

### EFFECT OF DIFFERENT SCHEMES OF COMBINED PLASTIC DEFORMATION ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF COPPER M06

Physical and mechanical properties of copper M06 are studied after deformation by different schemes of combined processing including equal-channel angular pressing (ECAP) and one of the methods of conventional treatment (upsetting, rolling, drawing). It is shown that the application of combined treatment allows obtaining of a higher set of physical and mechanical properties of the material as compared to the conventional technologies. The effect of defect formation on the mechanical and physical properties of the material is established that is added in the course of deformation treatment (pores and microcracks).

**Keywords:** copper, equal-channel angular pressing, hardness, density, upsetting, rolling, drawing, pores, microcracks, wire

**Fig. 1.** Schemes of combined plastic deformation: *a* – ECAP + upsetting, *b* – ECAP + multi-upsetting, *в* – ECAP + rolling, *г* – ECAP + drawing

**Fig. 2.** Deformation dependence of copper hardness under different schemes of combined treatment: *a* – ECAP + upsetting, *b* – ECAP + multi-upsetting ; the numbers above the columns are the values of the degree of deformation *e*

**Fig. 3.** Deformation dependence of copper density under different schemes of combined treatment: *a* – ECAP + upsetting, *b* – ECAP + multi-upsetting, *в* – ECAP + rolling, *г* – ECAP + drawing

**Fig. 4.** Diagrams of tensile tests under different schemes of deformation treatment: 1 – HE + drawing, 2 – ECAP\_90 + drawing, 3 – ECAP\_160 + drawing