

УДК 538.9:53.091:539.374.6

ВЛИЯНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО И ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МЕДИ, ПОДВЕРГНУТОЙ ВИНТОВОЙ ЭКСТРУЗИИ**Ткаченко Виктор Михайлович¹**, канд. физ.-мат. наук**Бережной Ярослав Андреевич^{1,2}****Сапронов Александр Николаевич¹**¹Донецкий физико-технический институт, ДНР, Россия²Донецкий государственный университет, ДНР, РоссияE-mail: v.tkachenko@mail.ru

Аннотация. В работе приведены данные по структурному анализу и изменению прочностных свойств крупнокристаллической и наноструктурированной меди под влиянием гидростатического и горячего прессования. Крупнокристаллическое состояние достигалось при термической обработке. Наноструктурирование меди осуществлялось многопроходной обработкой винтовой экструзией до накопления больших степеней деформации. Методами металлографического анализа исследована зеренная структура меди, подвергнутой указанным видам обработки с разной степенью деформации. Изменение свойств материала определялось по измерениям его плотности и твердости. Выявлены параметры проведения термомеханической обработки, приводящие как к активации рекристаллизационных процессов, так и к развитию фрагментации. Определены режимы обработки, приводящие к повышению плотности и прочности меди.

Ключевые слова: наноматериалы, микроструктура, прочность, интенсивная пластическая деформация, винтовая экструзия, гидростатическое прессование.

EFFECT OF HYDROSTATIC AND HOT PRESSING ON THE CHANGE IN GRAIN STRUCTURE AND STRENGTH PROPERTIES OF COPPER SUBJECT BY TWIST EXTRUSION**Viktor M. Tkachenko, Ph. D.****Yaroslav A. Berezhnoy****Alexander N. Sapronov**

Abstract. This paper presents data on the structural analysis and changes in the strength properties of coarse-crystalline and nanostructured copper under the influence of hydrostatic and hot pressing. The coarse-crystalline state was achieved through heat treatment. Nanostructuring of the copper was achieved by multi-pass processing using screw extrusion until high degrees of deformation were accumulated. Metallographic analysis methods were used to study the grain structure of copper subjected to the specified types of processing with varying degrees of deformation. Changes in the material properties were determined by measurements of the density and hardness of it. Thermomechanical processing parameters leading to both the activation of recrystallization processes and the development of fragmentation were identified. Processing modes leading to an increase in the density and strength of copper were determined.

Keywords: nanomaterials, microstructure, strength, severe plastic deformation, twist

extrusion, hydrostatic pressing.

Введение

Интерес к нанокристаллическим и субмикрокристаллическим металлам и сплавам вызван демонстрацией этими материалами высоких физико-механических и технологических свойств, что обусловлено малым размером структурных элементов, большой протяженностью границ зерен и высокой плотностью дислокаций [1, 2].

Для получения нанокристаллических и субмикрокристаллических материалов используется несколько подходов. Наибольшее распространение из них для разработки объемных изделий получили методы интенсивной пластической деформации. Наиболее используемыми методами интенсивной пластической деформации являются: кручение под высоким давлением, равноканальное угловое прессование, винтовая экструзия, накапливающееся соединение прокаткой и всесторонняя изотермическая ковка [1, 2].

Достижимые физико-механические свойства нанокристаллических и субмикрокристаллических материалов, полученных методами интенсивной пластической деформации, тесно связаны со структурными перестройками, происходящими в процессе обработки. Хотя физические механизмы эволюции микроструктуры при интенсивной пластической деформации требуют дальнейшего изучения, многочисленные исследования показывают, что формирование нанокристаллической и субмикрокристаллической структуры определяется эволюцией ячеек или дислокационных субструктур, образующихся на ранних стадиях деформации, в сверхмелкозернистые структуры с высокоугловыми границами в процессе последующей деформации [1, 3].

Возможность улучшения физико-механических свойств металлических материалов различными методами комбинированной обработки, сочетающими методы интенсивной пластической деформации и традиционные методы обработки давлением, показана в ряде работ [4 – 6]. Анализ результатов этих работ показывает, что конечная микроструктура, свойства и форма обрабатываемого материала определяются как микроструктурой, так и текстурой материала, подвергнутого интенсивной пластической деформации перед операцией обработки металла (или операциями), а также её параметрами.

Целью данной работы является установление закономерностей влияния степени деформации гидростатического и горячего прессования на изменение микроструктуры, физических и механических свойств крупнокристаллической и субмикрокристаллической меди, полученной методом винтовой экструзии.

1. Материал и методы исследования

В качестве материала для исследований использовалась отожженная медь марки М1 (химический состав в %: Cu - 99.9%; Fe < 0,005; Ni < 0,002; S < 0,004; As < 0,002; Pb < 0,005; Zn < 0,004; O < 0,05; Sb < 0,002; Bi < 0,001; Sn < 0,002). Термическая обработка осуществлялась в печи СНОЛ 7,2/1100 при температуре 600°C в течение 2 часов.

Для получения в меди наноструктурного состояния использовалась винтовая экструзия, осуществляемая при комнатной температуре на прессе силой 250 т с углом наклона винтовой линии к оси экструзии равным 55°. Обрабатываемые заготовки имели прямоугольное сечение со скругленными углами размером 28x18x60 мм. Обработку медных заготовок осуществляли за несколько проходов до накопления суммарной степени деформации $\epsilon \approx 6$. Степень деформации винтовой экструзии за один проход определялась по формуле [7]:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{r}{R} \operatorname{tg} \beta_{\max}, \quad (1)$$

где r – расстояние точки от оси заготовки (мм); R – максимальное расстояние точки от оси заготовки (мм); $\beta_{\max}$ – максимальное значение угла наклона винтовой линии к оси экструзии (град).

Реализация гидростатического прессования осуществлялась при комнатной температуре путем продавливания цилиндрической заготовки через коническую матрицу под действием высокого давления, создаваемого жидкостью за счет перемещения штока. В качестве рабочей жидкости использовалось индустриальное масло. Конические матрицы для прессования имели значение половины угла конусности (угол между образующей конуса и его осью) $\alpha/2 = 10^\circ$. Диаметры входного и выходного отверстия матрицы подбирались таким образом, чтобы получить степень деформации за один проход $e = 0,5$. Значение истинной деформации при гидростатическом прессовании определялось по формуле [8]:

$$e = \ln \left(\frac{D_0^2}{D_1^2} \right), \quad (2)$$

где D_0 – исходный диаметр заготовки (мм), D_1 – выходного отверстия матрицы (мм). Внутренний диаметр контейнера D_k выбирался с учетом минимизации относительного объема рабочей жидкости равным $D_k = (1,1-1,2) D_0$ [8].

Горячее прессование выполнялось в контейнере с конической матрицей, имеющей значение половины угла конусности $\alpha/2 = 30^\circ$. Значение истинной деформации определялось по формуле, аналогичной гидростатическому прессованию. Степень деформации за один проход составляла $e = 2,0$. Горячее прессование осуществлялось при температуре контейнера 400°C с предварительным разогревом заготовки до 600°C .

Структурные исследования осуществлялись при помощи оптической микроскопии на микроскопе Axiovert 40 MAT при увеличениях $100 \div 1000$ с использованием цифровой камеры Canon PowerShot A640, подключенной к персональному компьютеру. Для выявления зеренной структуры меди на предварительно отполированную поверхность образца воздействовали в течение 15 секунд реактивом, состоящем из кислоты HNO_3 , разбавленной на 50% с H_2O . Анализ фотографий микроструктуры проводился путем измерения размера зерен с использованием программы JMicroVision и построения гистограмм распределения зерен по размеру и определения среднего размера зерен.

Изучение зависимости изменения плотности образцов меди до и после разных видов обработки проводилось методом гидростатического взвешивания на весах Shimadzu AX 200. Плотность исследуемого материала определялась по формуле:

$$\rho = \frac{W_B}{W_B - W_{\text{ж}}} \cdot \rho_{\text{ж}}, \quad (3)$$

где W_B – вес образца в воздухе (г), $W_{\text{ж}}$ – вес образца в жидкости (г), $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости с известным удельным весом (г/см^3).

Определение зависимости прочностных свойств металла от степени и температуры деформации осуществлялось путем измерения твердости методом Виккерса на твердомере Vickers Hardness Tester HV-5. Для проведения измерения подготавливались образцы с параллельными плоскостями, поверхность для измерения подвергалась предварительной шлифовке и полировке. Вычисление твердости осуществлялось по формуле:

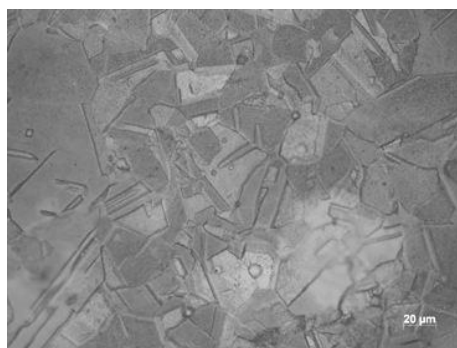
$$HV = 1.854 \cdot \frac{P}{d^2}, \quad (4)$$

где P – нормальная нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику (кгс); d – среднее арифметическое длин обеих диагоналей (мм).

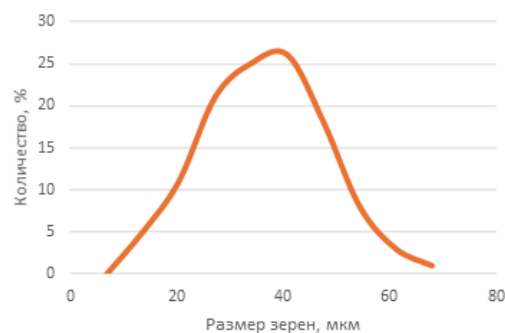
2. Полученные результаты и их обсуждение

Проведены исследования влияния винтовой экструзии, гидростатического и горячего прессования, а также комбинирования этих методов на изменение зеренной структуры и физико-механических свойств меди.

Данные, полученные с помощью оптической металлографии, свидетельствуют о том, что в исходном состоянии медь имела однородную в продольном и поперечном сечении микроструктуру. Зерна были равноосной формы (рисунок 1, а) и имели средний размер 37,4 мкм. Фиксируется большое количество двойников. Кривая частотного распределения зерен по размерам имеет форму, близкую к нормальному распределению (рисунок 1, б), минимальный размер зерен составил 8,01 мкм, максимальный – 68,2 мкм, максимальную частоту появления (26 %) имеют зерна размером 40,8 мкм.



а



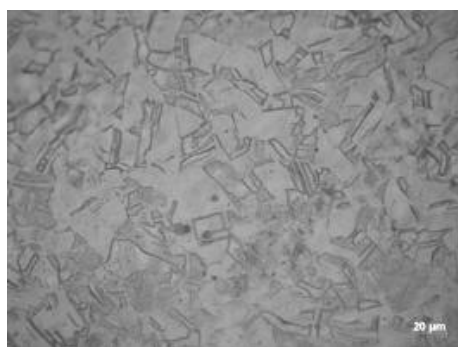
б

Рисунок 1. Структурные характеристики меди после отжига

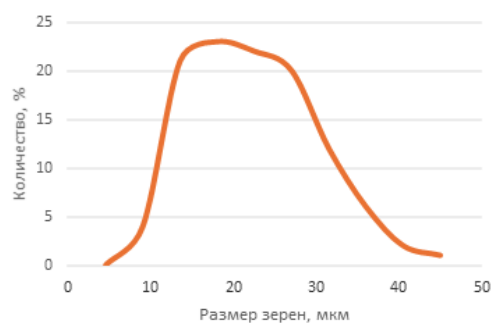
На рисунке 2 представлена структура и ее характеристики поперечного сечения крупнокристаллической медной заготовки, обработанной гидростатическим прессованием с разной степенью деформации.

При степени деформации гидропрессования $e=0,5$ микроструктура материала измельчается почти в 2 раза (рисунок 2, а) по сравнению с исходным отожженным состоянием. В поперечном сечении зерна имеют равноосную форму со средним размером структурных элементов 20,1 мкм. Кривая частотного распределения зерен по размерам имеет форму, близкую к логнормальному распределению (рисунок 2, б), минимальный размер зерен составил 6,52 мкм, максимальный – 44,85 мкм, максимальную частоту появления (23 %) имеют зерна размером 18,0 мкм.

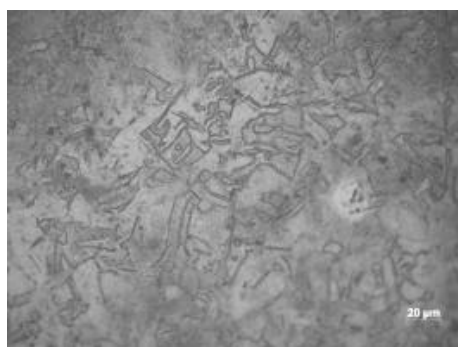
Увеличение степени деформации гидропрессования крупнокристаллической меди до $\epsilon=1,0$ способствует дальнейшему измельчению микроструктуры материала (рисунок 2, в). Средний размер структурных элементов уменьшается до значения 18,5 мкм. Кривая частотного распределения зерен по размерам имеет форму, близкую к логнормальному распределению (рисунок 2, г), минимальный размер зерен составил 8,95 мкм, максимальный – 42,52 мкм, максимальную частоту появления (22 %) имеют зерна размером 21,5 мкм.



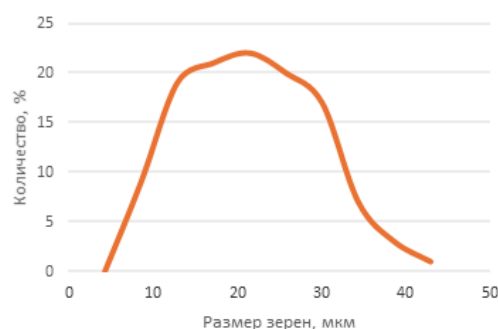
а



б



в



г

Рисунок 2. Структурные характеристики предварительно отожженной меди после гидропрессования со степенью деформации $\epsilon=0,5$ (а, б) и степенью деформации $\epsilon=1,0$ (в, г)

Структурные характеристики меди после винтовой экструзии и комбинированной обработки, сочетающей винтовую экструзию и гидростатическое прессование, показаны на рисунке 3. Обработка винтовой экструзией приводит к сильному измельчению зеренной структуры, размер структурных элементов уменьшается в 8,5 раз по сравнению с исходным отожженным состоянием. В продольном и поперечном сечении образцы имели схожую структуру с преимущественно равноосными мелкими зернами (рисунок 3, а). По данным оптической микроскопии средний размер структурных элементов составлял 4,4 мкм. Кривая частотного распределения зерен по размерам имеет форму, близкую к логнормальному распределению (рисунок 3, б), минимальный размер зерен составил 1,11 мкм, максимальный – 8,04 мкм, максимальную частоту появления (37 %) имеют зерна размером 3,2 мкм.

Проведение гидростатического прессования меди, в которой сформировано при винтовой экструзии наноструктурированное строение, приводит к дальнейшему измельчению структурных элементов. Размер зерен становится тем меньше, чем выше степень деформации гидропрессования. При степени деформации $\epsilon=0,5$ средний размер

структурных элементов уменьшается (рисунок 3, в) до значения 3,85 мкм. Кривая зависимости частоты появления зерен от их размера имеет форму, близкую к логнормальному распределению (рисунок 3, г), минимальный размер зерен составил 1,11 мкм, максимальный – 6,95 мкм, максимальную частоту появления (37 %) имеют зерна размером 2,8 мкм.

При гидростатическом прессовании наноструктурированной меди со степенью деформации $\epsilon=1,0$ размер структурных элементов уменьшается в 11,3 раза (рисунок 3, д) по сравнению с исходным отожженным состоянием. Средний размер структурных элементов уменьшается до значения 3,3 мкм. На диаграмме частотного распределения зерен по размерам кривая имеет форму, близкую к логнормальному распределению с более высоким пиком, смещенным в область более низких значений (рисунок 3, е), минимальный размер зерен составил 0,83 мкм, максимальный – 5,96 мкм, максимальную частоту появления (49 %) имеют зерна размером 2,4 мкм.

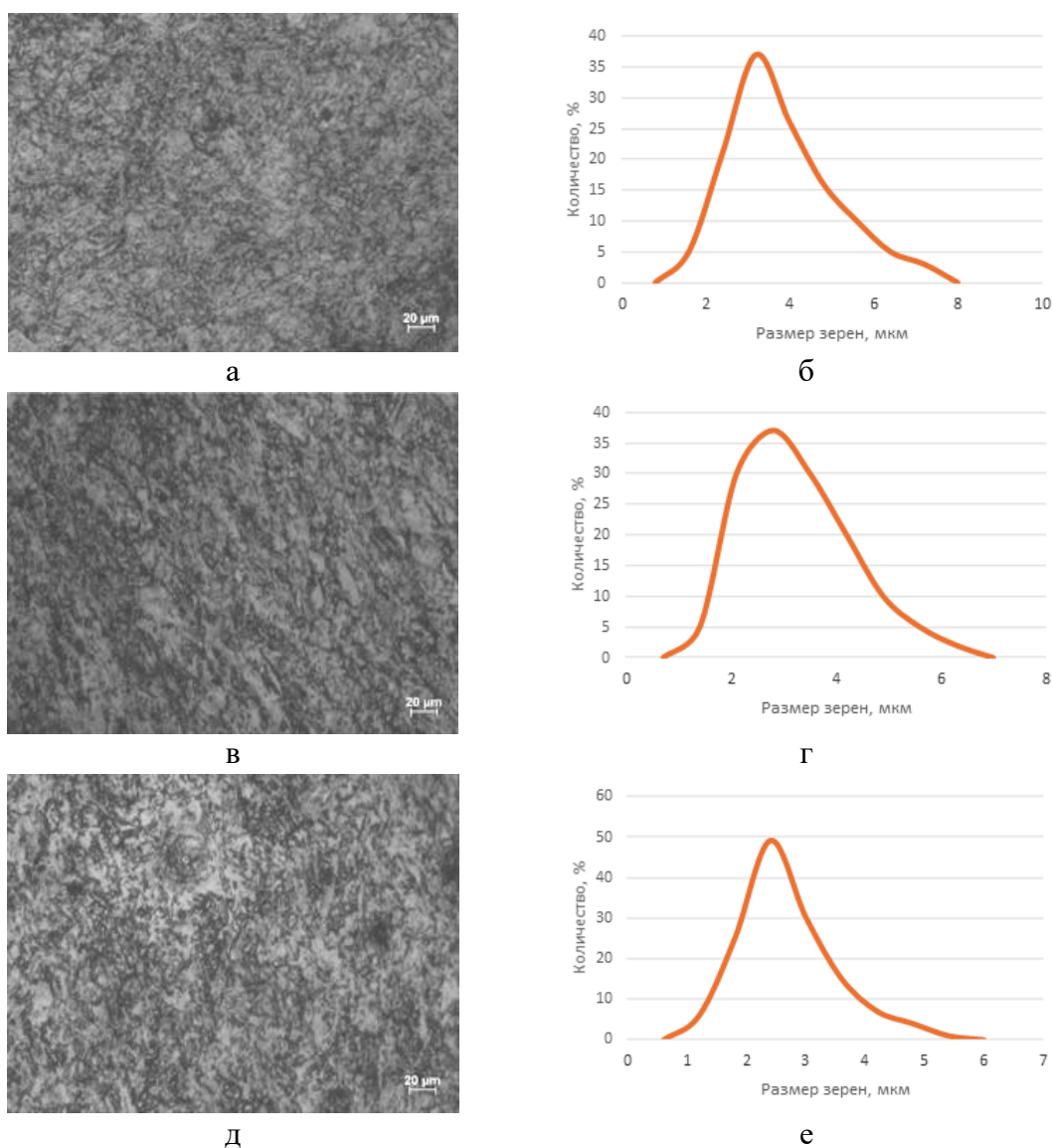


Рисунок 3. Структурные характеристики меди после винтовой экструзии (а, б) и сочетания винтовой экструзии с гидропрессованием со степенью деформации $\epsilon=0,5$ (в, г) и степенью деформации $\epsilon=1,0$ (д, е)

В процессе проведения горячего прессования при температуре выше температуры начала рекристаллизации фрагментация зеренной структуры во время деформации непрерывно чередуется с рекристаллизационными процессами, приводящими к зарождению и росту зерен.

Горячее прессование предварительно деформированной меди приводит к формированию рекристаллизованной микроструктуры (рисунок 4, а), подобной той, которая наблюдается при отжиге (рисунок 1, а). Наблюдается однородная в продольном и поперечном сечении микроструктура с крупными зернами равноосной формы, фиксируется большое количество двойников. Средний размер зерен составил 31,3 мкм.

В отличие от отожженного состояния, при горячем прессовании кривая частотного распределения зерен по размерам имеет форму, близкую к логнормальному распределению. Это свидетельствует о том, что протекание рекристаллизационных процессов проходит в условиях деформационного воздействия с активным развитием фрагментации. В результате этого пик распределения зерен смещен влево (рисунок 4, б), и преимущественное количество структурных элементов находится в области низких значений размера зерен. Минимальный размер зерен составил 8,99 мкм, максимальный – 64,83 мкм, максимальную частоту появления (23 %) имеют зерна размером 26 мкм.

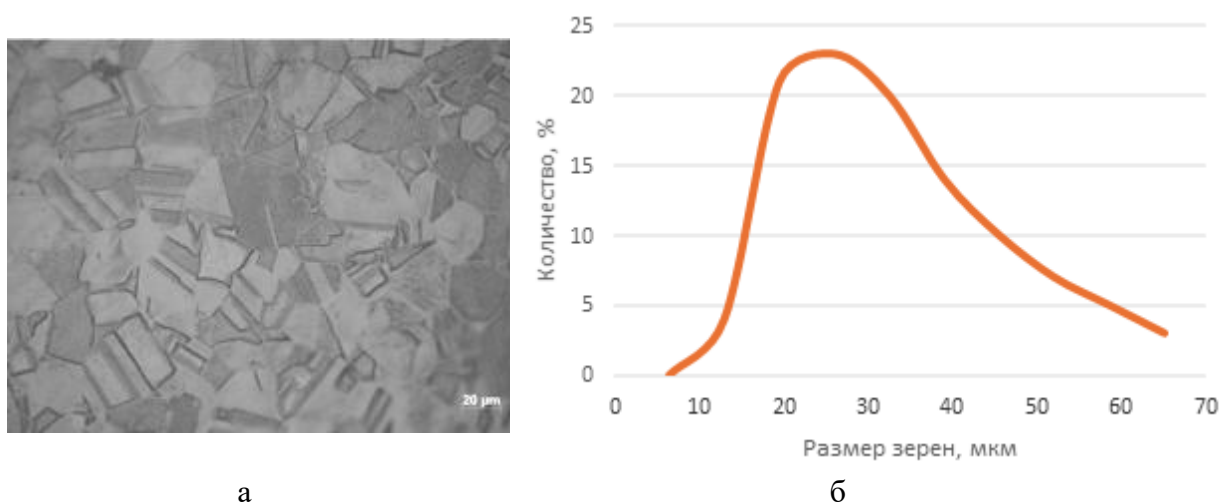


Рисунок 4. Структурные характеристики предварительно деформированной меди после горячего прессования

Влияние разных видов обработки на плотность меди показана на рисунке 5. Проведение гидростатического прессования крупнокристаллической меди со степенями деформации $\epsilon=0,5$ и $\epsilon=1,0$ практически не влияет на плотность материала.

При горячем прессовании предварительно деформированной меди развиваются рекристаллизационные процессы, приводящие к снятию всех деформационных дефектов, в результате чего плотность материала имеет значение как для исходного отожженного материала.

Во время проведения винтовой экструзии медь подвергается большим деформациям, в результате чего наблюдается некоторое снижение плотности материала, вызванное образованием и накоплением деформационных дефектов в ходе обработки.

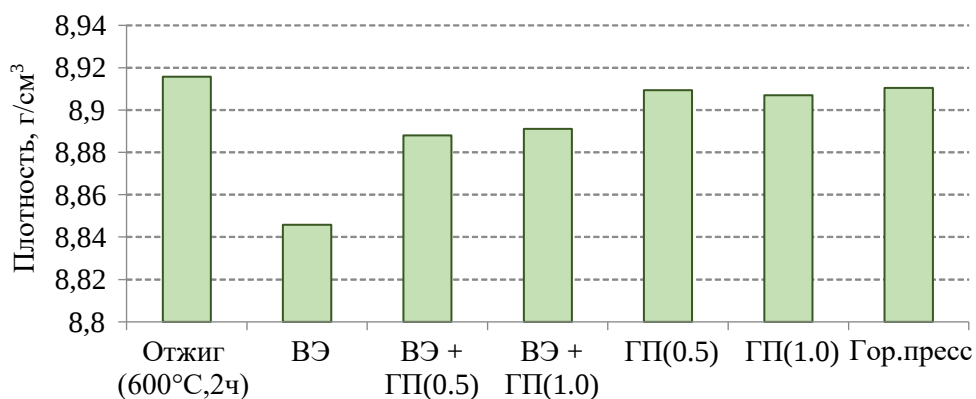


Рисунок 5. Изменение плотности меди после разных видов обработки

Гидростатическое прессование меди, предварительно подвергнутой винтовой экструзии, приводит к повышению значений плотности, которые увеличиваются с ростом степени деформации. Подобные эффекты наблюдались при смене схемы напряженно-деформированного состояния при комбинированной обработке [9, 10], а также может быть связано с тем, что при гидропрессовании за счет высоких давлений, создаваемых рабочей жидкостью, происходит залечивание деформационных дефектов в виде пор и микротрещин.

Зависимость изменения твердости по Виккерсу меди при разных видах и степени обработки представлена на рисунке 6.

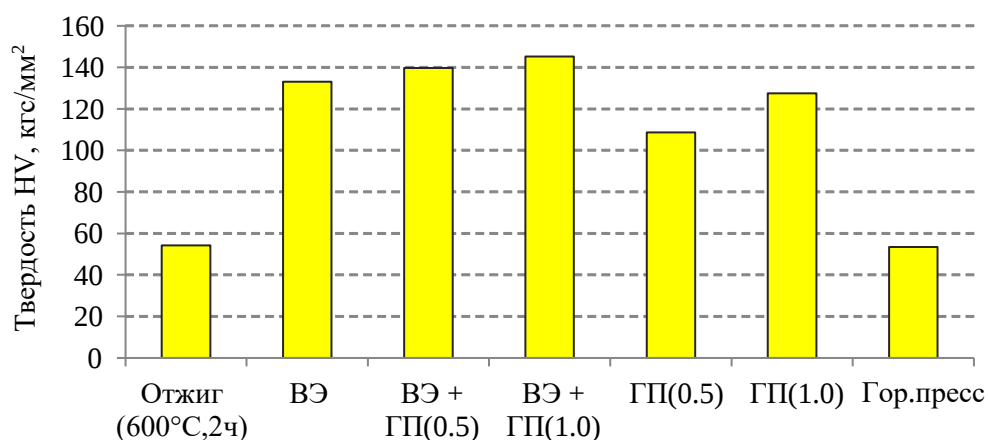


Рисунок 6. Зависимость твердости меди от вида обработки и степени деформации

В исходном отожженном состоянии медь имела крупнозернистую структуру и ее твердость составляла 54 кгс/мм².

Проведение гидростатического прессования крупнокристаллической меди приводит к повышению значений твердости, которые увеличиваются в 2,3 раза с повышением степени деформации до $\epsilon=1,0$.

Применение винтовой экструзии позволяет сформировать ультрамелкозернистую структуру, что приводит к повышению твердости примерно в 2,5 раза. Дальнейшее осуществление гидроэкструзии до степени деформации $\epsilon=1,0$ приводит к дополнительному упрочнению меди на 10 % относительно значений,

полученных на этапе винтовой экструзии, и в 2,7 раза относительно исходного отожженного состояния.

При горячем прессовании предварительно деформированной меди процессы упрочнения в ходе деформации непрерывно чередуются с рекристаллизационными процессами, приводящими к разупрочнению. Формирование при этом виде обработки полностью рекристаллизованной структуры приводит к снижению твердости меди до значения исходного отожженного состояния.

Заключение

Анализ данных, полученных при проведении измерений плотности и твердости материала, а также при изучении зеренной структуры с помощью оптической микроскопии, позволил выявить закономерность влияния термических и деформационных воздействий на перестройку структуры и изменение свойств меди с разным первоначальным структурным состоянием.

1. Показано, что деформационная обработка винтовой экструзией и комбинированием винтовой экструзии с гидропрессованием приводит к сильному измельчению структурных элементов – в 8,5 и 11,3 раза соответственно.

2. Выявлено, что структурные изменения, происходящие при рассматриваемых видах обработки, по-разному влияют на физико-механические свойства меди. Деформационные методы обработки, осуществляемые при комнатной температуре, приводят к повышению твердости материала в 2,5 раза с использованием метода винтовой экструзии и в 2,7 раз при применении комбинированной обработки. При винтовой экструзии наблюдается некоторое снижение плотности меди из-за вносимых дефектов деформационного характера. Реализуемые при гидропрессовании высокие всесторонние давления способствуют залечиванию дефектов и уплотнению материала. Развивающиеся при горячем прессовании рекристаллизационные процессы приводят к возврату исследуемых характеристик свойств меди на уровень отожженного материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Валиев, Р. З. Объёмные наноструктурные металлические материалы / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М: Академкнига, 2007. – 398 с.
2. Маркушев, М. В. К вопросу об эффективности методов интенсивной пластической деформации, предназначенных для получения объемных наноструктурных материалов. / М. В. Маркушев // Письма о материалах. – 2011. – Т. 1, № 1. – С. 36–42.
3. Vailev, R. Z. Using Severe Plastic Deformation to Produce Nanostructured Materials with Superior Properties / R. Z. Vailev, B. Straumal, T. G. Langdon // Annual Review of Materials Research. – 2022. – Vol.52, Iss.1. – P. 357-382.
4. Polyakov, A. V. Fatigue life and failure characteristics of an ultrafine-grained Ti-6Al-4V alloy processed by ECAP and extrusion / A. V. Polyakov, I. P. Semenova, Y. Huang, R. Z. Valiev, T. G. Langdon // Adv. Eng. Mater. – 2014. – Vol.16, Iss.8. – P. 1038–1043.
5. Murashkin, M. Yu. Physical simulation of cold rolling of ultra-fine grained Al5083 alloy to study microstructure evolution / M. Yu. Murashkin, N. A. Enikeev, V. U. Kazykhanov, I. Sabirov, R. Z. Valiev // Rev. Adv. Mater. Sci. – 2013. – Vol.35, Iss.1-2. – P. 75–85.
6. Lima, G. F. Hydrogen storage properties of pure Mg after the combined processes of ECAP and cold-rolling / G. F. Lima, M. R. M. Triques, C. S. Kiminami, W. J. Botta, A. M.

Jr. Jorge // J. Alloy. Compd. – 2014. – Vol.586. – P.405–408.

7. Бейгельзимер, Я. Е. Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций / Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин [и др.]. – Донецк: Фирма ТЕАН, 2003. – 87 с.

8. Белошенко, В. А. Теория и практика гидроэкструзии / В. А. Белошенко, В. Н. Варюхин, В. З. Спусканюк - Киев: Наукова думка, 2007. - 246 с.

9. Сенникова, Л. Ф. Структура и свойства меди М06 после комбинированной пластической деформации / Л. Ф. Сенникова, Г.К. Волкова, В. М. Ткаченко, А. Н. Гангало // Вопросы материаловедения. – 2021. – Т. 105, № 1. – С. 21-27.

10. Сенникова Л. Ф., Ткаченко В. М., Гангало А. Н., Мороз Т. Т. Влияние разных схем комбинированной пластической деформации на физико-механические свойства меди марки М06 / Л. Ф. Сенникова, В. М. Ткаченко, А. Н. Гангало, Т. Т. Мороз // Физика и техника высоких давлений. – 2020. – Т. 30, №2. – С.65-72.

REFERENCES

1. Valiev, R. Z. Bulk nanostructured metallic materials / R. Z. Valiev, I. V. Alexandrov. - M: Akademkniga, 2007. - 398 p.

2. Markushev, M. V. On the efficiency of methods of severe plastic deformation intended for obtaining bulk nanostructured materials. / M. V. Markushev // Letters on materials. - 2011. - Vol. 1, No. 1. - P. 36 -42.

3. Vailev, R. Z. Using Severe Plastic Deformation to Produce Nanostructured Materials with Superior Properties / R. Z. Vailev, B. Straumal, T. G. Langdon // Annual Review of Materials Research. – 2022. – Vol.52, Iss.1. – P. 357-382.

4. Polyakov, A. V. Fatigue life and failure characteristics of an ultrafine-grained Ti-6Al-4V alloy processed by ECAP and extrusion / A. V. Polyakov, I. P. Semenova, Y. Huang, R. Z. Valiev, T. G. Langdon // Adv. Eng. Mater. – 2014. – Vol.16, Iss.8. – P. 1038–1043.

5. Murashkin, M. Yu. Physical simulation of cold rolling of ultra-fine grained Al5083 alloy to study microstructure evolution / M. Yu. Murashkin, N. A. Enikeev, V. U. Kazykhanov, I. Sabirov, R. Z. Valiev // Rev. Adv. Mater. Sci. – 2013. – Vol.35, Iss.1-2. – P. 75–85.

6. Lima, G. F. Hydrogen storage properties of pure Mg after the combined processes of ECAP and cold-rolling / G. F. Lima, M. R. M. Triques, C. S. Kiminami, W. J. Botta, A. M. Jr. Jorge // J. Alloy. Compd. – 2014. – Vol.586. – P.405–408.

7. Beygelzimer, Ya. E. Screw extrusion – the process of accumulation of deformations / Ya. E. Beygelzimer, V. N. Varyukhin [et al.]. – Donetsk: Firma TEAN, 2003. – 87 p.

8. Beloshenko, V. A. Theory and practice of hydroextrusion / V. A. Beloshenko, V. N. Varyukhin, V. Z. Spuskanyuk - Kyiv: Naukova Dumka, 2007. - 246 p.

9. Sennikova, L. F. Structure and properties of copper M0b after combined plastic deformation / L.F. Sennikova, G. K. Volkova, V. M. Tkachenko, A. N. Gangalo // Materials Science Issues. - 2021. - Vol. 105, No. 1. - P. 21-27.

10. Sennikova, L. F. Influence of different schemes of combined plastic deformation on the physical and mechanical properties of copper grade M0b / L. F. Sennikova, V. M. Tkachenko, A. N. Gangalo, T. T. Moroz // High Pressure Physics and Engineering. - 2020. - Vol. 30, No. 2. - P.65-72.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 03.02.2026; одобрена после рецензирования 13.02.2026; принята к публикации 25.02.2026

The article was submitted February 3, 2026; approved after reviewing February 13, 2026; accepted for publication February 25, 2026.