

РАЗДЕЛ 2. МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 539.89:669

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.01.013

ПОВЫШЕНИЕ СДВИГОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ РАЗРУШЕНИЯ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДИ МЕТОДОМ ГИДРОЭКСТРУЗИИ

**Яшарова Елизавета Владимировна¹, Гангало Александр Николаевич²,
Суравицкий Виктор Дациевич³, Бурховецкий Валерий Викторович⁴**

^{1,2,3,4}ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк, РФ

¹ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ

²ФГБНУ «Институт физики горных процессов», г. Донецк, РФ

¹yasharova.liza@yandex.ru, ORCID 0009-0002-8780-0918

²al-gangalo@yandex.ru, ORCID 0000-0001-5683-1346

³suroq94@gmail.com, ORCID 0009-0009-0722-4035

⁴val-bur_63@mail.ru, ORCID 0009-0004-6249-2722

Аннотация. В работе исследовалось влияние пост обработки гидроэкструзией на сдвиговое напряжение разрушения при растяжении меди с субмикроструктурной структурой, сформированной равноканальным угловым прессованием. Показано, что обработка гидроэкструзией оказывает положительное влияние на пластические характеристики материала. Выявлено, что в интервале деформаций $\epsilon_{ГЭ} = 0...0.6$ рост сдвигового напряжения разрушения приводит к увеличению предела прочности до 10%, а при дальнейшем повышении величины деформации гидроэкструзией предел прочности падает вследствие деформационного разогрева. Сканирующей электронной микроскопией исследованы поверхности разрушения. Определена величина соотношения предела прочности к сдвиговому напряжению разрушения, при которой изменяется механизм разрушения при растяжении от сдвигового на механизм нормального отрыва. Оценено влияние деформации гидроэкструзии на размеры ямок разрушения: средний диаметр ямок возрастает почти в 2 раза, что свидетельствует о повышении вязкости материала. Исследованы структурные изменения материала методом просвечивающей электронной микроскопии, показано формирование аксиальной текстуры в процессе обработки гидроэкструзией, что привело к повышению сдвигового напряжения разрушения и предела прочности.

Ключевые слова: сдвиговое напряжение разрушения, субмикроструктурная структура, медь, гидроэкструзия, равноканальное угловое прессование, деформация, предел прочности, относительное удлинение, относительное сужение, механизм разрушения, угол отрыва.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Проекта по созданию молодежных лабораторий и государственного задания FREZ-2024-0001, тема «Объемные и пленочные наноструктурированные материалы с высоким уровнем физических и механических свойств».

Для цитирования: Яшарова Е.В., Гангало А.Н., Суравицкий В.Д., Бурховецкий В.В. Повышение сдвигового напряжения разрушения субмикроструктурной меди методом гидроэкструзии // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2026. Т. 23, № 1. С. 124-132. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.01.013.

Original article

FRACTURE SHEAR STRESS INCREASING OF ULTRA-FINE GRAINED COPPER BY HYDROSTATIC EXTRUSION

Elizaveta V. Iasharova¹, Alexandr N. Gangalo², Victor D. Surovitsky³, Valery V. Burkhovetskii⁴

^{1,2,3,4}Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering, Donetsk, 283048, DPR, Russia

¹Donetsk State University, Donetsk, 283001, DPR, Russia

²Institute of Physics of Mining Processes, Donetsk, 283048, DPR, Russia

¹yasharova.liza@yandex.ru, ORCID 0009-0002-8780-0918

²al-gangalo@yandex.ru, ORCID 0000-0001-5683-1346

³suroq94@gmail.com, ORCID 0009-0009-0722-4035

⁴val-bur_63@mail.ru, ORCID 0009-0004-6249-2722

Abstract. The effect of postprocessing by hydrostatic extrusion on the fracture shear stress during tensile testing of ultra-fine grained copper obtained by equal-channel angular pressing was investigated. The hydrostatic extrusion processing influence has a positive effect on the plastic characteristics of the material was shown. The fracture shear stress increasing leads to increase the tensile strength to 10% in the range of $\varepsilon_{HE}=0..0.6$, with a further increase of deformation value the tensile strength decreases due to deformation heating was revealed. The fracture surfaces were examined by scanning electron microscopy. The tensile strength to the fracture shear stress ratio value, at which the mechanism of tensile fracture changes from shear to the mechanism of normal separation, was determined. The deformation of the hydrostatic extrusion influence on the dimples size was estimated: the mean dimples diameter raising almost twofold, which indicates an increase in the material viscosity. Structural changes in the material were studied by transmission electron microscopy. The axial texture during the hydrostatic extrusion process was formed, which leads to fracture shear stress and tensile strength increasing.

Keywords: fracture shear stress, ultra-fine grained structure, copper, hydrostatic extrusion, equal-channel angular pressing, deformation, strength, relative elongation, relative constriction, fracture mechanism, fracture angle.

Acknowledgements: The work was supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of a Project to create youth laboratories and a state assignment FREZ-2024-0001, the topic is "Bulk and film nanostructured materials with a high level of physical and mechanical properties".

For citation: Iasharova E.V., Gangalo A.N., Surovitsky V.D., Burkhovetskii V.V. (2026). Fracture shear stress increasing of ultra-fine grained copper by hydrostatic extrusion. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 23(1), 124-132. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.01.013.

Введение

Медь – один из важнейших металлов, обладающих высокой пластичностью, ковкостью, тепло- и электропроводностью, а также высокой стойкостью к коррозии [1]. Медь и её сплавы широко используются в различных механических деталях, включая сварочные электроды одноточечных сварочных аппаратов, автомобильные детали, гидравлические линии давления и многие другие. Поэтому улучшение механических свойств меди для расширения её применения является актуальной исследовательской задачей [2].

Одним из подходов к решению является измельчение зеренной структуры до субмикроструктурного (СМК) состояния, для чего применяют методы интенсивной пластической

деформации (ИПД) [3, 4]. Использование этих методов позволяет в 2-3 и более раза повысить прочностные характеристики меди и сплавов на ее основе [5, 6]. Наиболее распространенным методом ИПД для получения прутковых материалов является метод равноканального углового прессования (РКУП) [7]. Суть метода заключается в продавливании заготовки через два пересекающихся канала, в результате чего материал испытывает интенсивные деформации простого сдвига, что приводит к измельчению зерна вплоть до наноразмеров и значительному повышению прочности. Однако, сопоставление прочностных свойств на примере магниевых сплавов с одинаковым размером зерна после РКУП и радиально-сдвиговой прокатки показало большие значения в пользу прокатки [8]. Это связано с тем, что в процессе обработки РКУП

в материале образуется наклоненная на $45\text{--}50^\circ$ к направлению прессования базисная текстура [9]. Формирование такой текстуры после РКУП приводит к заниженным значениям критического напряжения сдвига для основных действующих систем деформаций, что косвенно свидетельствует о снижении прочности [8].

Исследование режима разрушения меди при испытаниях на растяжение после обработки РКУП (1-3 перехода) показало, что независимо от числа циклов материал разрушается по сдвиговому механизму с углом отрыва $\theta=45^\circ$ [10]. Согласно критерию разрушения при растяжении, это свидетельствует о незначительной величине отношения сдвигового напряжения разрушения τ_0 к нормальному напряжению разрушения σ_0 [11].

Дополнительное увеличение прочности меди СМК структурой, сформированной РКУП, возможно при повышении величины сдвигового напряжения разрушения. Для этого рекомендуется скомбинировать обработку с другой схемой деформирования, что уменьшит влияния текстуры, сформированной простым сдвигом [12, 13]. Так, например, применение гидроэкструзии (ГЭ) после обработки РКУП алюминиевого сплава АМц в зависимости от величины деформации позволило повысить прочность ещё на 5-20% [14].

Цель данной работы исследовать влияние деформации гидроэкструзии на сдвиговое напряжение разрушения и прочность субмикроструктурной меди, сформированной равноканальным угловым прессованием.

2. Материал и методика исследования

Материалом для исследования служила бескислородная медь марки М06, предварительно отожженная (600°C 2 часа), с пределом прочности на разрыв $\sigma_b=242\pm 4$ МПа и относительным удлинением $\delta=47.1\pm 0.5\%$. Для перевода в СМК состояние заготовки диаметром 20 мм и длиной 140 мм были обработаны с использованием установки для РКУП с соответствующим диаметром рабочего канала, углом его пересечения $\Phi=90^\circ$ и углом внешнего закругления $\Psi=37^\circ$. Это обеспечивало деформацию за один проход ≈ 1 [15]. Медные заготовки подверглись 12 циклам прессования с поворотом вокруг своей оси на 90° после каждого цикла деформирования (маршрут ВС [12]). Данный деформационный режим для меди

обеспечивает формирование однородной равноосной структуры [16, 17]. Таким образом суммарная деформация, накопленная РКУП в заготовках, составила $\epsilon_{\text{РКУП}}=12$.

В дальнейшем СМК медь после удаления концевых эффектов РКУП (20 мм с каждого торца) обрабатывалась ГЭ. На установке с рабочим диаметром контейнера 22 мм материал деформировался через коническую матрицу с выходным диаметром отверстия $d_m=11$ мм с различными степенями деформации $\epsilon_{\text{ГЭ}}=\ln(d_3^2/d_m^2)=0.3, 0.6, 0.9, 1.2$, где d_3 – диаметр заготовки, на который перетачивалась заготовка перед ГЭ. Скорость перемещения пуансона составляла 3 мм/с, рабочей жидкостью выступало индустриальное масло ИЗО.

Сдвиговое напряжение разрушения τ_0 определялось на базе критерия «эллипса» по значениям предела прочности σ_b при растяжении и угла отрыва θ , используя зависимость этих параметров, представленную на рис. 1 [11].

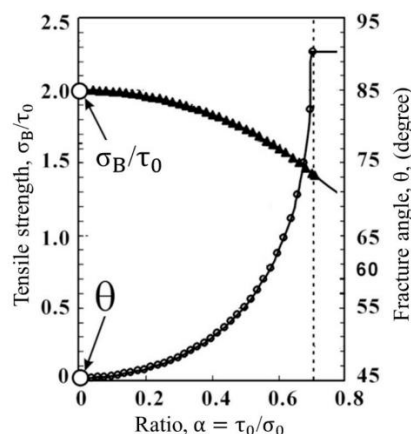


Рис.1. Зависимость относительного предела прочности σ_b/τ_0 и угла отрыва θ от отношения $\alpha=\tau_0/\sigma_0$ [11].

Fig. 1. Dependence of the tensile strength σ_b/τ_0 and fracture angle θ on the ratio $\alpha=\tau_0/\sigma_0$ [11].

Испытания на растяжение проводили на разрывной машине Р-50 на образцах с диаметром разрывной части 5 мм с пятикратной длиной (ГОСТ 1497–84, тип III) со скоростью деформации $\dot{\epsilon}=1\times 10^{-3}\text{с}^{-1}$. Макроскопический вид пластичного разрушения фотографировали с использованием цифровой камеры, установленной в Apple iPhone 13 Pro. Угол отрыва измеряли с использованием программы ImageJ. Микрорельеф центральной части поверхности

разрушения исследовали с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием микроскопа JSM-6490LV. Микроструктуру исследовали методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с использованием микроскопа JEOL JEM-200A.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 показано влияние деформации гидроэкструзии $\varepsilon_{ГЭ}$ на макроскопический вид пластического разрушения при растяжении ме-

ди с СМК структурой, сформированной РКУП. В исходном состоянии разрушение происходит по типу косоугольного излома с углом отрыва $\theta=50^\circ$. Различия величины угла отрыва с данными работ [10], по-видимому, связаны с большим числом циклов РКУП, что обеспечивает однородную равноосную структуру без вытянутых зерен вдоль линии сдвига [8, 16], и погрешностью измерений. С применением обработки ГЭ угол отрыва θ растет с увеличением степени деформации $\varepsilon_{ГЭ}$ и достигает максимального значения $\theta=90^\circ$ при деформации $\varepsilon_{ГЭ}=1.2$, характер разрушения переходит в чашечный тип.

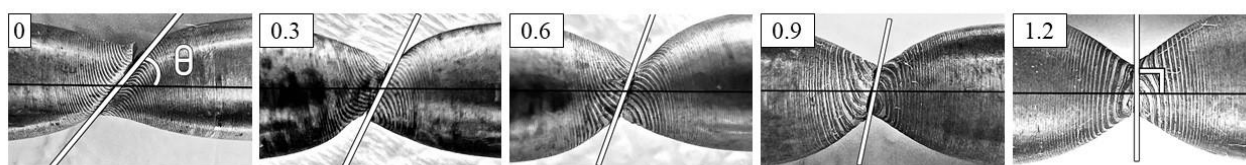


Рис. 2. Влияние деформации ГЭ на макроскопический вид пластического разрушения при растяжении СМК меди.

Fig. 2. The effect of hydrostatic extrusion deformation on the macroscopic appearance of plastic fracture during tensile testing of ultra-fine grained (UFG) copper.

Зависимость угла отрыва θ и отношения предела прочности к сдвиговому напряжению разрушения, построенное по критерию «эллипса» [11], от деформации ГЭ представлено на рис. 3. Как видно, в исходном состоянии отношение предела прочности к сдвиговому напряжению разрушения СМК меди имеет максимальное значение $\sigma_b/\tau_0=1.86$. С применением деформации ГЭ происходит снижение данного отношения на всем промежутке деформаций вплоть до $\sigma_b/\tau_0=1.4$ при максимальном уровне деформации ГЭ $\varepsilon_{ГЭ}=1.2$. При этом интенсивное снижение σ_b/τ_0 до 1.60 наблюдается сразу после смены схемы деформирования при деформации ГЭ $\varepsilon_{ГЭ}=0.3$, после чего происходит практически линейное понижение σ_b/τ_0 с увеличением деформации ГЭ. Снижение отношения предела прочности к сдвиговому напряжению разрушения под действием ГЭ возможно при снижении предела σ_b прочности или повышении сдвигового напряжения разрушения τ_0 , а также может являться результатом их взаимного изменения.

Влияние деформации ГЭ на механические свойства при растяжении СМК меди приведено в таблице 1. До обработки ГЭ сдвиговое напряжение разрушения составляло

$\tau_0=233\pm 5$ МПа, а предел прочности $\sigma_b=434\pm 10$ МПа. Применение ГЭ повышает обе прочностные характеристики до максимальных значений $\tau_0=324\pm 5$ МПа и $\sigma_b=477\pm 8$ МПа при величине деформации $\varepsilon_{ГЭ}=0.9$. С превышением этой величины деформации происходит снижение прочностных свойств, что связано с интенсификацией процессов динамического возврата и рекристаллизации вследствие деформационного разогрева при ГЭ [18, 19].

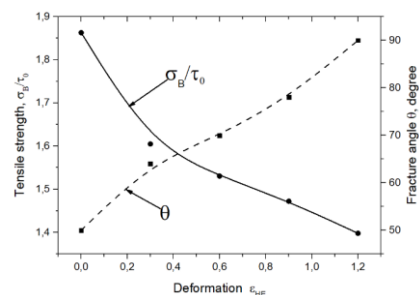


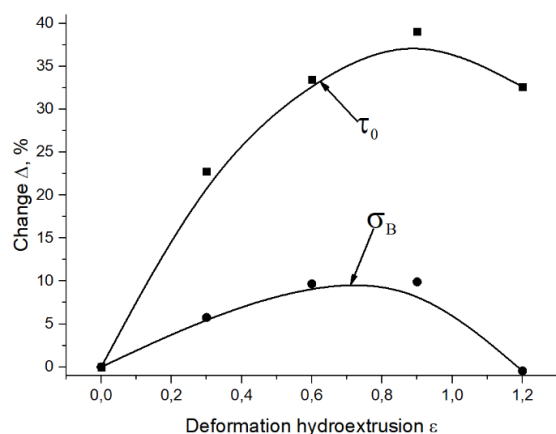
Рис. 3. Зависимость угла отрыва при растяжении СМК меди и отношения предела прочности к сдвиговому напряжению разрушения σ_b/τ_0 от деформации гидроэкструзией.

Fig. 3. Dependence of UFG copper fracture angle θ during tensile testing and the tensile strength σ_b/τ_0 on the deformation value ε_{HE} .

Таблица 1. Влияние деформации гидроэкструзией на механические свойства СМК меди.**Table 1.** The effect of hydrostatic extrusion deformation on the UFG copper mechanical properties.

Деформация гидроэкструзией $\varepsilon_{ГЭ}$	0	0,3	0,6	0,9	1,2
Сдвиговое напряжение разрушения τ_0 , МПа	233±5	286±5	311±5	324±5	309±10
Предел прочности σ_b , МПа	434±10	459±8	476±7	477±8	432±14
Относительное сужение ψ , %	77.0±2.2	85.8±2.0	86.7±1.8	88.8±2.1	91.1±1.8
Относительное удлинение δ , %	19.3±0.4	19.9±0.3	19.1±0.3	18.9±0.3	21.0±0.4

Для дальнейшего анализа влияния обработки ГЭ на механические свойства СМК меди при растяжении на рис. 4 показано относительное изменение сдвигового напряжения разрушения $\Delta\tau_0$ и предела прочности $\Delta\sigma_b$ от деформации $\varepsilon_{ГЭ}$. Как видно, приращение сдвигового напряжения разрушения от деформации ГЭ больше, чем для предела прочности, что объясняет снижение их отношения (рис. 3) при росте обеих характеристик. На отрезке деформации гидроэкструзией $\varepsilon_{ГЭ}=0-0.6$ наблюдается интенсивное приращение прочностных характеристик, которое достигает значений $\Delta\tau_0=33.5\%$ и $\Delta\sigma_b=9.7\%$. С увеличением деформации до $\varepsilon_{ГЭ}=0.9$ наблюдается замедление роста прочностных характеристик, особенно предела прочности, при этой величине их повышение достигает максимума $\Delta\tau_0=39.0\%$ и $\Delta\sigma_b=9.9\%$. Обработка ГЭ с деформацией $\varepsilon_{ГЭ}=1.2$ приводит к незначительному снижению приращения сдвигового напряжения разрушения $\Delta\tau_0=32.6\%$ и к полной потере для предела прочности $\Delta\sigma_b=-0.5\%$.

**Рис. 4.** Относительное изменение сдвигового напряжения разрушения $\Delta\tau_0$ и предела прочности при растяжении $\Delta\sigma_b$ от деформации $\varepsilon_{ГЭ}$.**Fig. 4.** Dependence of the change in fracture shear stress $\Delta\tau_0$ and tensile strength $\Delta\sigma_b$ on deformation ε_{HE} .

Гидроэкструзия оказывает положительное влияние на пластические характеристики СМК меди, особенно на относительное сужение, которое в исходном состоянии составляла $\psi=77.0\pm 2.2\%$ (табл. 1). Применение ГЭ с малой степенью деформации $\varepsilon_{ГЭ}=0.3$ приводит к интенсивному увеличению относительного сужения до $\psi=85.8\pm 2.0\%$, также наблюдается и небольшой рост относительного удлинения, который возрастает с $\delta=19.3\pm 0.4\%$ до $\delta=19.9\pm 0.3\%$. Дальнейшее увеличение степени деформации приводит к монотонному увеличению относительного сужения до $\psi=91.1\pm 1.8\%$ при максимальной величине деформации ГЭ. Относительное удлинение ведет себя иначе: при величине деформации ГЭ $\varepsilon_{ГЭ}=0.6-0.9$ происходит его снижение до $\delta=18.9\pm 0.3\%$, а при деформации $\varepsilon_{ГЭ}=1.2$ рост до $\delta=21.0\pm 0.4\%$. Увеличение относительного удлинения при $\varepsilon_{ГЭ}=1.2$, по видимому, связано со снижением прочностных характеристик в результате процессов динамического возврата и рекристаллизации.

Сканирующая электронная микроскопия центральной части поверхности разрушения при растяжении СМК меди для всех образцов показала наличие волокнистой зоны, состоящей из разделенных гребнями ямок, в которой зарождаются, развиваются и объединяются поры, что характерно вязкому типу разрушения. На внутренней поверхности ямок наблюдаются волнистые линии, что свидетельствует о скольжении меди по линиям скольжения вследствие большой пластической деформации в процессе роста ямок перед разрушением.

В исходном состоянии после РКУП волокнистая зона СМК меди состоит из ямок параболической формы, вытянутых в одну сторону, что свидетельствует о сдвиговом механизме разрушения (рис 5а). В случае последующей ГЭ с деформацией $\varepsilon_{ГЭ}=0.3$ волокнистая зона состоит из равноосных ямок нормального отрыва (рис 5б). Снижение отношения предела прочности к сдвиговому напряжению разрушения $\sigma_b/\tau_0=1.86$ в исходном состоянии до $\sigma_b/\tau_0=1.60$

после ГЭ достаточно для изменения механизма разрушения со сдвигового в механизм нормального отрыва. По-видимому, качественное изменение механизма разрушения при малой величине деформации ($\epsilon_{ГЭ}=0.3$) и приводит к повышению пластических характеристик, отмеченных выше.

Оценка размеров ямок разрушения показала, что применение ГЭ приводит к их росту. В исходном состоянии средний размер ямок составлял $d_{ср}=5.6 \mu\text{m}$, после ГЭ с максимальной деформацией увеличился до $d_{ср}=10.7 \mu\text{m}$. Укрупнение ямочного рельефа в процессе обработки ГЭ свидетельствует о повышении вязкости материала, поскольку для образования трещины необходима большая пластическая деформация при слиянии пор и формировании ямок отрыва [20].

Влияние деформации ГЭ на структурные изменения меди с СМК структурой исследова-

лись вдоль оси деформирования. В исходном состоянии после предварительной обработки РКУП была сформирована равноосная структура с размером зерен 200-300 nm и высокоугловой разориентировкой границ (рис. 6. а). Для малых деформаций ГЭ значимых изменений структуры не наблюдалось. При увеличении деформации до $\epsilon_{ГЭ}=1.2$ происходит формирование аксиальной текстуры с зернами размером до 500 nm, вытянутыми вдоль оси деформирования (рис. 6 б).

В технически чистых металлах с СМК структурой зарождение микропор и развитие трещин происходит преимущественно на границах зерен [20, 21]. Формирование вытянутых зерен вдоль оси нагружения препятствует развитию сдвигового механизма разрушения, тем самым повышая сдвиговое напряжение разрушения и предел прочности материала.

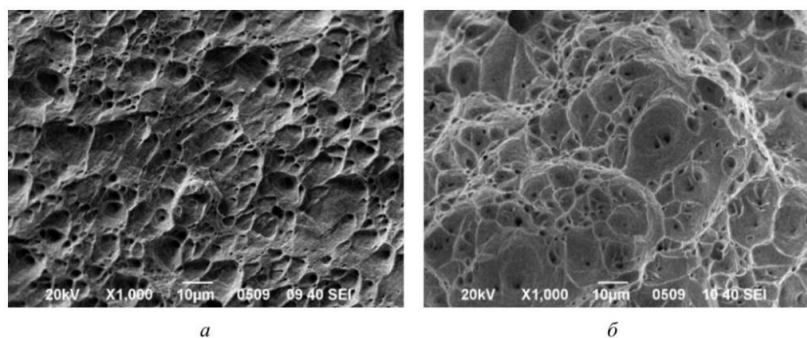


Рис. 5. Микрорельеф центральной части поверхности разрушения при растяжении СМК меди: а – в исходном состоянии ($\sigma_b/\tau_0=1.86$), б – после гидроэкструзии с $\epsilon_{ГЭ}=0.3$ ($\sigma_b/\tau_0=1.60$). СЭМ, контраст во вторичных электронах.

Fig. 5. The fracture surface central part of UFG copper tensile test: а – initial state ($\sigma_b/\tau_0=1.86$), б – after hydrostatic extrusion with $\epsilon_{HE}=0.3$ ($\sigma_b/\tau_0=1.60$). SEM, the contrast is in the secondary electrons.

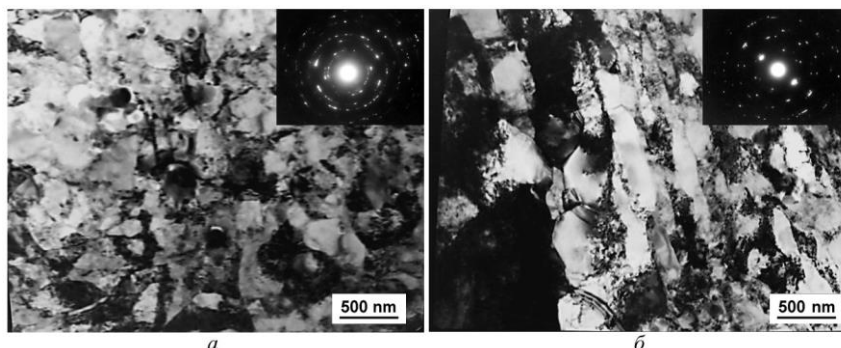


Рис. 6. Микроструктура СМК меди вдоль оси деформирования (ПЭМ): а – исходное состояние, б – после гидроэкструзии с $\epsilon_{ГЭ}=1.2$.

Fig. 6. Microstructure of UFG copper along the deformation axis (TEM): а – initial state, б – after hydrostatic extrusion with $\epsilon_{HE}=1.2$.

4. Выводы

1. Пост обработка гидроэкструзией меди с субмикроструктурной структурой, сформированной равноканальным угловым прессованием, позволяет дополнительно повысить прочностные свойства материала при растяжении. Гидроэкструзия с деформацией до $\epsilon_{гэ}=0.6$ обеспечивает наиболее эффективное влияние роста сдвигового напряжения разрушения на повышение предела прочности. В этом диапазоне деформаций сдвиговое напряжение разрушения повышается на 33.5% до $\tau_0=324\pm 5$ МПа, а предел прочности на 9.7% до $\sigma_b=476\pm 7$ МПа.

2. Снижение отношения предела прочности к сдвиговому напряжению разрушения с $\sigma_b/\tau_0=1.86$ до $\sigma_b/\tau_0=1.60$ приводит к изменению механизма разрушения при растяжении со сдвигового на механизм нормального отрыва.

Список литературы

1. M. Morales, E. Xuriguera, M. Martínez, J.A. Padilla, J. Molera, N.Ferrer, M. Segarra, and F. Espiell, Mechanical Characterization of Copper-Copper Wires Joined by Friction Welding Using Instrumented Indentation Technique, *J. Mater. Eng. Perform.*, 2014, 23, p 3941–3948.
2. M.J. Zehetbauer and R.Z. Valiev, *Nanomaterials by Severe Plastic Deformation*, Wiley, Hoboken, 2006, p 12–90.
3. Volokitin A.V., Volokitina I.E., Denissova A.I., Seref Sonmez M. Severe plastic deformation methods influence on the structure and properties of metal materials: A review // *Johnson Matthey Technology Review*. 2025. V. 69. Is. 2. P. 198–213. DOI:10.1595/205651325X17343556140949.
4. Valiev R.Z., Straumal B., Langdon T.G. Using severe plastic deformation to produce nanostructured materials with superior properties // *Annual Review of Materials Research*. 2022. V. 52. P. 357–382. DOI: 10.1146/annurev-matsci-081720-123248.
5. Edalati K., Bachmaier A., Beloshenko V.A., Beygelzimer Y. et al. Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances // *Materials Research Letters*. 2022. V. 10. N 4. P. 163-256. DOI: 10.1080/21663831.2022.2029779.
6. Valiev, R.Z., Alexandrov, I.V., Kawasaki, M., and Langdon, T.G., *Ultrafine-Grained Materials*, Springer Nature, 2024.
7. Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др. Процессы пластического структурообразования. Минск: Наука і тэхніка, 1994. 232 с.
8. Серебряный В.Н., Добаткин С.В., Эстрин Ю.З., Галкин С.П., Диез М. Сравнительный анализ вклада текстуры в уровень механических свойств мелкозернистых магниевых сплавов после равноканального углового прессования и радиально-сдвиговой прокатки. *Технология легких сплавов*. №2, 2015. С.112-118.
9. Серебряный В.Н., Дьяконов Г.С., Копылов В.И., Салищев Г.А., Добаткин С.В. Вклад текстуры и структуры в повышение низкотемпературной пластичности сплава МА2-1пч системы Mg-Al-Zn-Mn, подвергнутого РКУП и отжигам. *Физика металлов и металловедение*. 2013, том 114, №5, с. 488-496.
10. Hoseini, S.H., Khalilpourazary, S. & Zadshakoyan, M. Fracture Behavior of Annealed and Equal Channel Angular Pressed Copper: An Experimental Study. *J. of Mater Eng and Perform* 29, 975–986 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04598-z>.
11. Zhang Z.F., Eckert J. Unified tensile fracture criterion // *Physical Review Letters*. 2005. V. 94. Art. N 094301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.94.094301.
12. Валиев Р.З., Жилияев А.П., Ленгдон Т.Дж. Объемные наноструктурные материалы: фундаментальные основы и применения. СПб.: Эко-Вектор, 2017. 479 с.
13. Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н., Орлов Д.В., Сынков С.Г. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации. – Донецк: Фирма ТЕАН, 2003.– 87 с.
14. Сенникова Л.Ф., Гангало А.Н., Свиридова Е.А., Васильев С.В., Ткаченко В.М. Влияние разовой степени деформации гидроэкструзией на механические свойства сплава АМц, предварительно обработанного равноканальным угловым прессованием // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения*. 2024. № 4 (87). С. 71-76.
15. Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-tine grained materials / Y. Iwahashi., J. Wang, Z. Horita et al. // *Scripta Materialia*. – 1996. – V. 35. – P. 143-146.
16. Dalla Torre, F. Microstructures and properties of copper processed by equal channel extrusion for 1– 16 passes / F. Dalla Torre, R. Lapovok, J. Sandlin, P. F. Thomson, C. H. J. Davies, E. V.

Pereloma // Acta Mater. – 2004. – V. 52. – P. 4819–4832.

17. Утяшев Ф.З., Рааб Г.И. Научные основы деформационных технологий формирования ультрамелкозернистых и наноструктурных объемных материалов: монография. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 160 с.

18. Pachla W., Rulczyk M., Smalc-Koziorowska J., Przybysz S., Wroblewska M., Skiba J., Przybysz M. Enhanced strength and toughness in ultra-fine grained 99.9% copper obtained by cryo-hydrostatic extrusion // Materials Characterization. – 2018. – Vol.141. – P. 375–387.

19. Гангало, А.Н. Влияние гидропрессования на механические свойства ультрамелкозернистой меди / А.Н. Гангало, Е.В. Яшарова, Л.Ф. Сенникова, В.Д. Суловицкий, В.В. Бурховецкий, В.А. Глазунова // Деформация и разрушение материалов. 2025г. №10, С19-27. DOI: 10.31044/1814-4632-2025-10-19-27/.

20. Ботвина Л.Р. Основы фактодиагностики. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2022. – 394с.

21. Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г. Эволюция микроскопических трещин и пор в нагруженных твердых телах. Физика твердого тела, 2005, том 47, вып. 5. С.801-807.

Информация об авторах

Е.В. Яшарова – инженер-исследователь ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»; магистрант Донецкого государственного университета; +79493536750.

А.Н. Гангало – кандидат технических наук, заведующий лабораторией «Объемных и пленочных наноструктурированных материалов» ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»; +79494273846.

В.Д. Суловицкий – ведущий инженер ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»; +79495870053.

В.В. Бурховецкий – научный сотрудник ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина»; +79496456045.

References

1. M. Morales, E. Xuriguera, M. Martí nez, J.A. Padilla, J. Molera, N.Ferrer, M. Segarra, and F. Espiell, Mechanical Characterization of Copper-Copper Wires Joined by Friction Welding Using

Instrumented Indentation Technique, J. Mater. Eng. Perform., 2014, 23, p 3941–3948.

2. M.J. Zehetbauer and R.Z. Valiev, Nanomaterials by Severe Plastic Deformation, Wiley, Hoboken, 2006, p 12–90.

3. Volokitin A.V., Volokitina I.E., Denissova A.I., Seref Sonmez M. Severe plastic deformation methods influence on the structure and properties of metal materials: A review // Johnson Matthey Technology Review. 2025. V. 69. Is. 2. P. 198–213. DOI:10.1595/205651325X17343556140949.

4. Valiev R.Z., Straumal B., Langdon T.G. Using severe plastic deformation to produce nanostructured materials with superior properties // Annual Review of Materials Research. 2022. V. 52. P. 357–382. DOI: 10.1146/annurev-matsci-081720-123248.

5. Edalati K., Bachmaier A., Beloshenko V.A., Beygelzimer Y. et al. Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances // Materials Research Letters. 2022. V. 10. N 4. P. 163-256. DOI: 10.1080/21663831.2022.2029779.

6. Valiev, R.Z., Alexandrov, I.V., Kawasaki, M., and Langdon, T.G., Ultrafine-Grained Materials, Springer Nature, 2024.

7. Segal V.M., Reznikov V.I., Kopylov V.I. et al. Processes of plastic structure formation. Minsk: Navuka i tekhnika, 1994. 232 p.

8. Serebryanyy V.N., Dobatkin S.V., Estrin Yu.Z., Galkin S.P., Diez M. Comparative analysis of the contribution of texture to the level of mechanical properties of fine-grained magnesium alloys after equal channel angular pressing and radial shear rolling. Technology of light alloys. No. 2, 2015. P.112-118.

9. Serebryanyy V.N., Dyakonov G.S., Kopylov V.I., Salishchev G.A., Dobatkin S.V. Contribution of texture and structure to the increase in low-temperature plasticity of alloy MA2-1pch of the Mg-Al-Zn-Mn system subjected to ECAP and anneals. Physics of metals and metal science. 2013, V. 114, No. 5, P. 488-496.

10. Hoseini, S.H., Khalilpourazary, S. & Zadshakoyan, M. Fracture Behavior of Annealed and Equal Channel Angular Pressed Copper: An Experimental Study. J. of Mater Eng and Perform 29, 975–986 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04598-z>.

11. Zhang Z.F., Eckert J. Unified tensile fracture criterion // Physical Review Letters. 2005. V. 94. Art. N 094301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.94.094301.

12. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk nanostructured materials: fundamental principles and applications. SPb.: Ekho-Vektor, 2017. 479 p.
13. Beygelzimer Ya.E., Varyukhin V.N., Orlov D.V., Synkov S.G. Screw extrusion – process of strain accumulation. – Donetsk: Firma TEAN, 2003.– 87 p.
14. Sennikova L.F., Gangalo A.N., Sviridova E.A., Vasiliev S.V., Tkachenko V.M. Influence of single deformation degree by hydroextrusion on mechanical properties of AMts alloy, pre-processed by equal channel angular pressing // Progressive technologies and systems of mechanical engineering. 2024. No. 4 (87). P. 71-76.
15. Principle of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-tine grained materials / Y. Iwahashi., J. Wang, Z. Horita et al. // Scripta Materialia. – 1996. – V. 35. – P. 143-146.
16. Dalla Torre, F. Microstructures and properties of copper processed by equal channel extrusion for 1– 16 passes / F. Dalla Torre, R. Lapovok, J. Sandlin, P. F. Thomson, C. H. J. Davies, E. V. Pereloma // Acta Mater. – 2004. – V. 52. – P. 4819– 4832.
17. Utyashev F.Z., Raab G.I. Scientific foundations of deformation technologies for forming ultrafine-grained and nanostructured bulk materials: monograph. Moscow; Vologda: Infra-Engineering, 2021. 160 p.
18. Pachla W., Rulczyk M., Smalc-Koziorowska J., Przybysz S., Wroblewska M., Skiba J., Przybysz M. Enhanced strength and toughness in ultra-fine grained 99.9% copper obtained by cryo-hydrostatic extrusion // Materials Characterization. – 2018. – Vol.141. – P. 375–387.
19. Gangalo, A.N. Influence of hydropressing on mechanical properties of ultrafine-grained copper / A.N. Gangalo, E.V. Yasharova, L.F. Sennikova, V.D. Surovitskiy, V.V. Burkhovetskiy, V.A. Glazunova // Deformation and fracture of materials. 2025, No. 10, P. 19-27. DOI: 10.31044/1814-4632-2025-10-19-27/.
20. Botvina L.R. Fundamentals of fractodiagnosics. Moscow: TECHNOSPHERE, 2022. – 394 p.
21. Betekhtin V.I., Kadomtsev A.G. Evolution of microscopic cracks and pores in loaded solids. Physics of the Solid State, 2005, vol. 47, issue 5. P. 801-807.

Information about the authors

E.V. Iasharova – research engineer at Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering; master's student at Donetsk State University; +79493536750.

A.N. Gangalo – Candidate of Technical Sciences, head of the laboratory “Bulk and Film Nanostructured Materials” at Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering; +79494273846.

V.D. Surovitsky – leading engineer at Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering; +79495870053.

V.V. Burkhovetskiy – research associate at Galkin Donetsk Institute for Physics and Engineering; +79496456045.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 14.11.2025; одобрена после рецензирования 23.02.2026; принята к публикации 02.03.2026.

The article was received by the editorial board on 14 Nov. 2025; approved after reviewing 23 Feb. 2026; accepted for publication 02 Mar. 2026.