

ПРЕССОВАНИЕ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ И ВИНТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗ МЕДИ М4

© 2017 г. А.М. Иванов

Институт физико-технических проблем Севера (ИФТПС) им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

Статья поступила в редакцию 27.04.16 г., доработана 23.11.16 г., подписана в печать 28.11.16 г.

Рассматриваются методы прессования призматических и винтовых металлических профилей. Приведен пример холодного прессования заготовки из меди М4 с получением сплошного профиля квадратного сечения. Проведено сравнение традиционного прессования (экструдирования) и экструдирования с последующим прессованием с кручением (экструдирования и винтового прессования – ЭВП) по механическим характеристикам, энергоёмкости и характеру разрушения образцов из меди. При этом ЭВП заготовки выполнялось в одном устройстве при одном технологическом процессе. Прессованию призматических и винтовых профилей в 1 проход при комнатной температуре подвергали объёмные медные заготовки $\varnothing 11,7 \times 60$ мм. Нагружение заготовки пуансоном осуществлялось с помощью гидравлического пресса. После деформационной обработки были получены сплошные призматические и винтовые профили с квадратным сечением 8×8 мм. Представлены результаты по механическим свойствам, закономерностям деформирования и механизму разрушения при одноосном растяжении образцов из технической меди М4 в состоянии поставки и после упрочнения. Механические испытания на одноосное растяжение образцов с рабочим размером $\varnothing 3 \times 15$ мм проводили на испытательной машине UTS-20k при постоянной скорости нагружения, равной $3,33 \cdot 10^{-5} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Установлено некоторое повышение прочности меди, подвергнутой экструзии в один проход при комнатной температуре. Винтовое прессование после экструзии обеспечивает более высокую пластичность по сравнению с исходным состоянием и экструзией. Выполнено фрактографическое исследование изломов образцов на сканирующем электронном микроскопе «Hitachi TM 3030» в режиме вторичных электронов. Показано, что механизм разрушения медных образцов в состоянии поставки, а также после экструзии и ЭВП качественно одинаковый. Разрушение образцов из меди М4 как в исходном состоянии, так и после деформационной обработки по указанным режимам произошло по механизму вязкого разрушения. Выявлено, что медь, подвергнутая ЭВП, обладает большей энергоёмкостью в связи с повышением пластичности. Излом в волокнистой зоне для образца, подвергнутого ЭВП, отличается ярусным расположением блоков ямок. Крупные ямки и микроямки во всех состояниях меди присутствуют как в волокнистой зоне, так и в периферийной области среза.

Ключевые слова: экструзия, винтовое прессование, медь, прочность, пластичность, фрактография, излом образца, механизм разрушения.

Иванов А.М. – канд. техн. наук, вед. науч. сотр. ИФТПС СО РАН (677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1).
Тел.: (4112) 39-05-79. E-mail: a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru.

Для цитирования: Иванов А.М. Прессование призматических и винтовых профилей из меди М4 // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 3. С. 77–84. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-3-77-84.

Ivanov A.M.

Press forming of prismatic and screw-shaped sections of M4 copper

The paper considers pressing methods for prismatic and screw-shaped metal sections. An example of cold pressing of a M4 copper billet to produce a solid square section making is provided. The paper compares traditional pressing (extrusion) and extrusion with subsequent pressing and torsion (extrusion and screw pressing) with regard to mechanical characteristics, energy intensity and fracture pattern of copper samples. At the same time, extrusion and screw pressing of a billet was carried out in one device within one process operation. Bulk copper billets $\varnothing 11,7 \times 60$ mm were subjected to prismatic and screw-shaped section pressing in one pass at the room temperature. A hydraulic press was used for billet pressing with a punch. Solid copper prismatic and screw-shaped sections with a square section of 8×8 mm were obtained following the deformation processing. The paper presents findings on mechanical properties, deformation regularities, and the fracture mechanism during monoaxial stretching of M4 commercial copper samples in the as-delivered and as-hardened states. Mechanical tests for monoaxial stretching of samples with working dimensions of $\varnothing 3 \times 15$ mm was made using the UTS-20k testing machine at a constant loading rate of $3,33 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. A certain strength improvement of copper extruded in one pass at a room temperature was found. Screw pressing after extrusion ensures a higher ductility as compared to the original state and extrusion. The paper describes a fractographic investigation of fractures in samples using the Hitachi TM 3030 scanning electron microscope in the secondary electron mode. The paper demonstrates that the fracture mechanism of copper samples in the as-delivered state, as well as following the extrusion and extrusion and screw pressing, is qualitatively the same. Fracturing of M4 copper samples both in the original state and following deformation processing under the indicated regimes occurred by a mechanism of ductile fracture. It was found that copper subjected to extrusion and screw pressing featured greater energy intensity due to higher

ductility. The fracture in the fibrous area of the sample subjected to extrusion and screw pressing is notable for the tiered arrangement of pit blocks. Large pits and micropits in all copper states are present both in the fibrous area and in the peripheral area of the cut.

Keywords: extrusion, screw pressing, copper, strength, ductility, fractography, sample fracture, fracture mechanism.

Ivanov A.M. – Cand. Sci. (Tech.), leading researcher of the Institute of Physical and Technical Problems of the North n.a. V.P. Larionov, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (677980, Russia, Yakutsk, Oktyabr'skaya str., 1).
E-mail: a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru.

Citation: *Ivanov A.M.* Pressovanie prizmaticheskikh i vintovykh profilei iz medi M4. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya.* 2017. No. 3. P. 77–84. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-3-77-84.

Введение

Как известно, для изготовления полуфабрикатов и изделий из металлов и сплавов используются, в частности, заготовки в виде круга, пластины, листа, проволоки и пр., полученные в результате прокатки, волочения и других технологических операций. Производство изделий со сложной формой поперечного сечения осуществляется путем штамповки, токарных и фрезерных работ и т.д. При этом механические свойства металлических материалов, из которых изготовлены изделия, практически сохраняют те же значения, что и у исходной заготовки, или изменяются незначительно. Вместе с тем в определенных случаях необходимы изделия с более высокими механическими характеристиками. Для изменения структуры и физико-механических свойств металлических материалов применяются различные методы деформационной обработки. Так, в настоящее время перспективны методы интенсивной пластической деформации (ИПД) для формирования ультрамелкозернистых (УМЗ) состояний в металлических материалах [1, 2 и др.].

Общие сведения о сущности процесса прессования металлов, характере напряженно-деформированного состояния, температурно-скоростном режиме, технологиях получения изделий рассмотрены в [3–6 и др.]. Для упрочнения металлов и сплавов широко применяется один из методов ИПД — равноканальное угловое прессование (РКУП). По данным электронной микроскопии [7], после 8 проходов РКУП средний размер зерен меди составляет ~200 нм, что приводит к значительному увеличению прочности при низком уровне пластичности. При этом частичное восстановление пластичности достигается соответствующей термической обработкой с сохранением высокой прочности. Для получения нанокристаллического состояния в меди в работе [8] выполнена динамическая пластическая деформация. Показано, что при относительно небольших деформациях в условиях температуры жидкого азота имеет

место интенсивное двойникование. Последующая холодная прокатка меди приводит к уменьшению количества нанодвойников и небольшому укрупнению зерен. С ростом деформации при холодной прокатке наступает насыщение в изменении размера зерна на уровне 110 нм. Снижение прочности и повышение пластичности в меди, предварительно подвергнутой динамической пластической деформации при температуре жидкого азота, вызваны холодной прокаткой.

Технологические основы производства профилей из металлов и сплавов представлены в [6]. Для изготовления режущего инструмента, например сверл, разработан метод горячего гидродинамического выдавливания [9]. В работе [10] при исследовании влияния многопроходной деформации методом винтовой экструзии (ВЭ) на распределение механических свойств в объеме заготовок из технически чистого титана установлено, что теплая ВЭ приводит к формированию в заготовках высоких прочностных свойств в сочетании с высокой пластичностью. Схемы прямой (ГЭ) и угловой (УГЭ) гидроэкструзии с финальным волочением использованы в работе [11]. При этом показано, что максимальная прочность меди на растяжение в изученном интервале температур (4,2–295 К) достигается при комбинированном применении методов ГЭ и УГЭ с заключительным волочением. Кроме того, выявлено, что в диапазоне $T = 295 \pm 77$ К субмикроструктурная медь, независимо от схемы деформационной обработки, обладает невысоким уровнем пластических свойств (однородная деформация до разрушения образца составляет ~2 %). Предел прочности при растяжении 686 МПа и относительное удлинение до разрушения 2 % [12] достигнуты в результате механических испытаний медной проволоки диаметром 0,5 мм благодаря, как и в [11], УГЭ, ГЭ и волочению.

Авторами [13] предложено комбинирование экструзии и кручения под высоким давлением. При выдавливании через секционные контейне-

ры заготовка подвергается деформации сдвига в месте пересечения контейнеров при их вращении друг относительно друга. Предложенный в работе [13] метод оценивается с помощью метода конечных элементов и экспериментально при обработке медных заготовок. Определенная проблема заключается в деформационной обработке крупнозернистых металлических заготовок с получением УМЗ-полуфабрикатов с формами и размерами, максимально приближенными к изделиям [14].

Объектами деформационной обработки и исследований выступают металлы и их сплавы. Как правило, медь используется как модельный материал для отработки схем и режимов обработки, а также как объект исследования. В результате динамической экструзии в [15] крупнозернистая (КЗ) медная заготовка была раздроблена на 4 части, а заготовка из УМЗ-меди — на 3 части. При этом УМЗ-структура в меди сформирована в результате РКУП в 16 проходов по маршруту B_c . В процессе динамической экструзии в УМЗ-меди произошла динамическая рекристаллизация, а в КЗ-меди — нет. В работе [16] приведены примеры обработки медной заготовки, в том числе экструзией по схеме «песочные часы». При циклической экструзии-осадке достигнуты размер зерен/субзерен 400 нм и предел прочности 450 МПа. В работе [17] показано, что напряжение течения в УМЗ-меди существенно зависит от температуры и скорости деформации, в отличие от температурно-нечувствительного поведения обычных ГЦК металлов. В УМЗ-меди при комнатной температуре активируются диффузионные механизмы деформации в границах зерен, которые не характерны для крупнокристаллической (КК) меди. При криогенных температурах в УМЗ- и КК-меди преобладающим механизмом деформации является кристаллографическое скольжение как в теле, так и в границах зерен. Несмотря на очевидный интерес к применению методов экструзии и винтового прессования в задачах обработки, не затронуты вопросы комбинирования этих методов с целью более эффективного упрочнения материалов и получения полуфабрикатов с отличающейся от исходной заготовки формой, в частности металлических профилей. Кроме того, представляет интерес изучение свойств и механизмов разрушения упрочненных металлических материалов.

Цель настоящей работы состояла в получении винтового профиля из технической меди марки М4 последовательной реализацией экструзии и

винтового прессования в одном устройстве при одной технологической операции, определении механических характеристик и изучении механизма разрушения образцов из упрочненной меди.

Методика исследований

Исследуемый материал — техническая медь в состоянии поставки, которая по химическому составу (в %): 99,1 Cu, 0,427 Zn, 0,132 Pb, <0,01 Sn, <0,005 P, 0,0028 Mn, 0,0054 Fe, 0,126 Ni, 0,0587 Si, <0,005 Mg, 0,0063 Cr, 0,0013 Al, 0,0077 S, <0,001 As, <0,01 Be, 0,0011 Ag, 0,0238 Co, 0,0235 Bi, <0,002 Cd, 0,0062 Zr — соответствует марке М4. Химический анализ проведен на атомно-эмиссионном спектрометре «Foundry-Master» (фирма «Worldwide Analytical Systems AG (WAS AG)», Германия).

Экструдированию и экструдированию с последующим винтовым прессованием (ЭВП) в 1 проход подвергали с помощью технологической оснастки (рис. 1) объемные медные заготовки $\varnothing 11,7 \times 60$ мм, которые были изготовлены из прутка диаметром 14 мм путем резания на токарном станке. Для осуществления того или иного вида обработки производилась замена соответствующего узла в матрице устройства. Сменная вставка со схемой комбини-

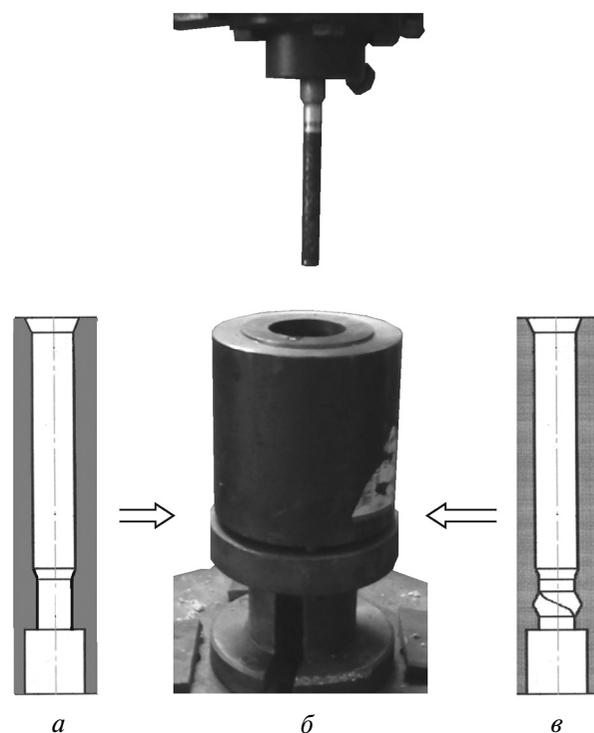


Рис. 1. Схемы экструдирования (а), ЭВП (б) объемной заготовки и устройство (б)

рования экструзии и винтового прессования была создана на основе изобретения [18].

При экструдировании объемная заготовка вставляется во входной канал $\varnothing 12$ мм, затем проходит через сужающийся участок с углом конуса 34° , а в последующем выпрессовывается в выходной канал квадратного сечения 8×8 мм. При ЭВП медная заготовка из входного канала $\varnothing 12$ мм выпрессовывается в выходной канал квадратного сечения 8×8 мм с правым винтовым вращением на участке длиной 12 мм. При этом угол конуса составляет $22^\circ 38'$, а угол наклона винтовой линии равен 10° . Поперечное сечение размером 8×8 мм вращается по правой винтовой линии с шагом 32 мм на угол 90° .

Нагружение заготовки пуансоном осуществлялось с помощью гидравлического пресса ПСУ 125 типа ЗИМ усилием 1250 кН. Для уменьшения трения поверхности заготовки об стенки канала матрицы использовалась технологическая смазка «Росойл-Ангелина» с добавками чешуйчатого графита. Эксперименты проводились при комнатной температуре. Усилие при экструдировании и ЭВП медной заготовки не превышало 8–10 кН. Точность определения усилия при прессовании составляла порядка ± 980 Н. Степень деформации сдвига при экструзии равна $\Lambda = 43\%$, а суммарная степень деформации при комбинировании экструзии и винтового прессования составила 43% в центре и 78% на краю винтового поперечного сечения, поскольку при винтовом прессовании в центре сечения $\Lambda = 0\%$, а на краю $\Lambda = 35\%$ [19].

Механические испытания на одноосное растяжение образцов с рабочим размером $\varnothing 3 \times 15$ мм проводили на испытательной машине UTS-20k («Buntmetall-Handels-GmbH», Германия) при постоянной скорости нагружения $\approx 3,33 \cdot 10^{-5}$ м·с $^{-1}$. Точность регистрации усилия при механических испытаниях на одноосное растяжение составляла ± 80 Н, а определения напряжений — $\pm 1,6$ МПа. Образцы из упрочненной меди для механических испытаний изготавливали из средней части заготовок. Испытывалось по 3 образца по каждому режиму. Фрактографические исследования изломов образцов выполняли на сканирующем электронном микроскопе ТМ 3030 («Hitachi High-Technologies Corporation», Япония) в режиме вторичных электронов¹.

¹ Съемки макро- и микрофрактограмм выполнены Н.Д. Коваленко.

Результаты и их обсуждение

В результате экструдирования и ЭВП получали образцы, показанные на рис. 2. Поскольку в схеме винтовой экструзии длина калибрующего участка меньше диаметра окружности, описанной вокруг поперечного сечения канала, то в соответствии с [19] в результате обработки получаем винтовой профиль.

Данные по механическим характеристикам меди М4 представлены в таблице. Образцы для растяжения были изготовлены из средней части (по поперечному сечению) призматического стержня с квадратным сечением и винтовым профилем.

Как видно из таблицы и кривых деформирования (рис. 3) медных образцов в состоянии поставки и после упрочнения, наблюдается небольшое (на 12 %) повышение прочности меди М4 в результате экструдирования и ЭВП. Сопоставимые значения прочности экструдированной меди и меди, подвергнутой ЭВП, можно объяснить тем, что образцы были изготовлены из центральной по поперечному сечению части заготовок, в которой степень сдвиговой деформации при винтовом прессовании минимальна. Поэтому в этой части

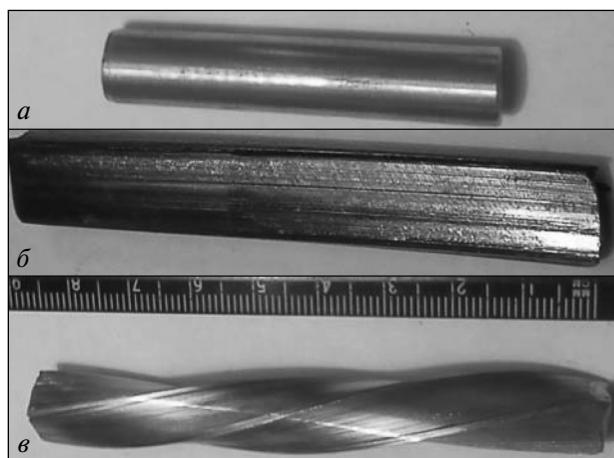


Рис. 2. Заготовки из меди М4

a – до обработки; *b* – после экструдирования; *v* – после ЭВП

Механические свойства меди М4

Режим обработки	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\delta_{\text{к}}$, %
Исходное состояние – состояние поставки	348	18,55
Экструзия (293 К, 1 проход)	390	17,78
ЭВП (293 К, 1 проход)	388	20,55

Примечание. $\delta_{\text{к}}$ – остаточное относительное удлинение образца.

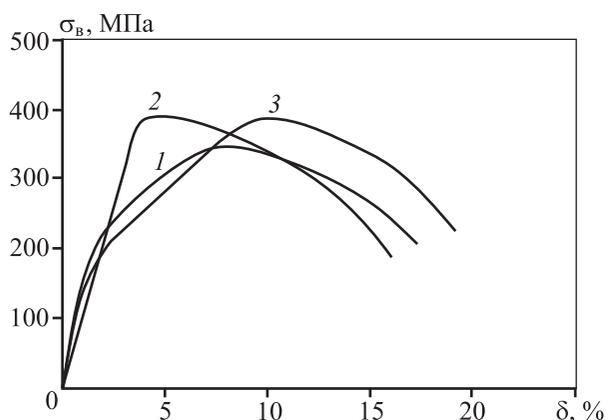


Рис. 3. Диаграммы растяжения меди М4 в различных состояниях

1 – состояние поставки; 2 – после экструзирования в 1 проход при $T = 293$ К; 3 – после ЭВП в 1 проход при $T = 293$ К

образца деформация определяется в основном экструзией. Если в случае экструзии пластичность меди остается на уровне исходного состояния, то ЭВП несколько повышает пластичность металла.

Для исследования влияния схемы деформирования при обработке заготовок на энергоёмкость меди был выполнен сопоставительный анализ удельной работы пластических деформаций по кривым деформирования. Анализ энергетических затрат при деформировании показал, что для экструдированной меди удельная работа деформаций ($0,69 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-3}$) и удельная работа пластических деформаций ($0,665 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-3}$) практически сопоставимы со значениями этих характеристик для исходной меди ($0,677$ и $0,66 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-3}$ соответственно). В то же время наблюдается увеличение данных показателей для меди, подвергнутой ЭВП ($0,752$ и $0,731 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-3}$ соответственно), примерно на 10–12 % по сравнению с исходным материалом. То есть медь, обработанная посредством ЭВП в 1 проход при комнатной температуре, обладает большей энергоёмкостью в связи с некоторым повышением пластичности. С увеличением количества проходов при деформационной обработке можно ожидать изменение значения разницы энергоёмкости материала по сравнению с исходным состоянием.

Качественная оценка изломов образцов из технической меди М4 (рис. 4) показала следующее. Характер разрушения образцов из М4 в состоянии поставки и в упрочненном состоянии при испытании одноосным растяжением качественно одинаковый. Излом цилиндрического образца с изначально круглым поперечным сечением после разрыва приобретает треугольную форму. Макро-

рельеф разрушения образцов из меди М4 в исходном и упрочненном состояниях показывает вязкое разрушение с образованием «чашечного» излома в шейке растянутого образца (см. рис. 4, а, г, ж). Поверхность разрушения матовая, неровная. На боковой поверхности шейки образца видны следы пластической деформации. Вязкий (волоконистый) излом свидетельствует о значительной пластической деформации, предшествующей разрушению.

Разрыв образцов произошел при значительном шейкообразовании с появлением губ среза. Для изломов образцов характерно наличие центральной зоны, в которой зарождаются, развиваются, объединяются поры, а также зоны среза. Вязкое разрушение образцов в исходном и упрочненном (двумя способами) состояниях характеризуется наличием ямок в центральной волокнистой зоне, разделенных гребнями, и среза в периферийной зоне на поверхности разрушения образца.

Исходное состояние. Волокнистая зона, в которой происходит медленный рост трещины, с очагом разрушения расположена в центральной части поперечного сечения (см. рис. 4, в). В ней образование ямок происходит путем слияния микропор при разрыве перемычек между ними. Топограмма отражает макрорельеф поверхности разрушения образца (см. рис. 4, б). Выбор участков для записи микрофрактограмм производится по макрофрактограммам и топограммам. Наблюдаемые на внутренних поверхностях ямок волнистые линии/ступеньки свидетельствуют о скольжении меди по полосам скольжения, приводящем к росту ямок. Вязкое разрушение в центральной части излома характеризуется ямками нормального отрыва, разделенными гребнями с острыми краями (см. рис. 4, в). В волокнистой зоне наблюдается широкий диапазон размеров квазиравноосных ямок вязкого излома, расположение которых неравномерное. Зона среза, образовавшаяся от действия касательных напряжений, выходит на свободную поверхность образца. Площадь зоны среза на поверхности разрушения, по сравнению с остальной частью, значительно меньше. Зона среза содержит систему ямок сдвига, вытянутых в направлении сдвига. Разрыв образца на данном участке произошел срезом вдоль полос сдвига.

Для изломов образцов из упрочненной посредством экструзии и ЭВП меди М4 характерно наличие тех же зон, что и для исходного материала.

После экструзии при $T = 293$ К. Излом образца состоит из двух треугольных участков, расположен-

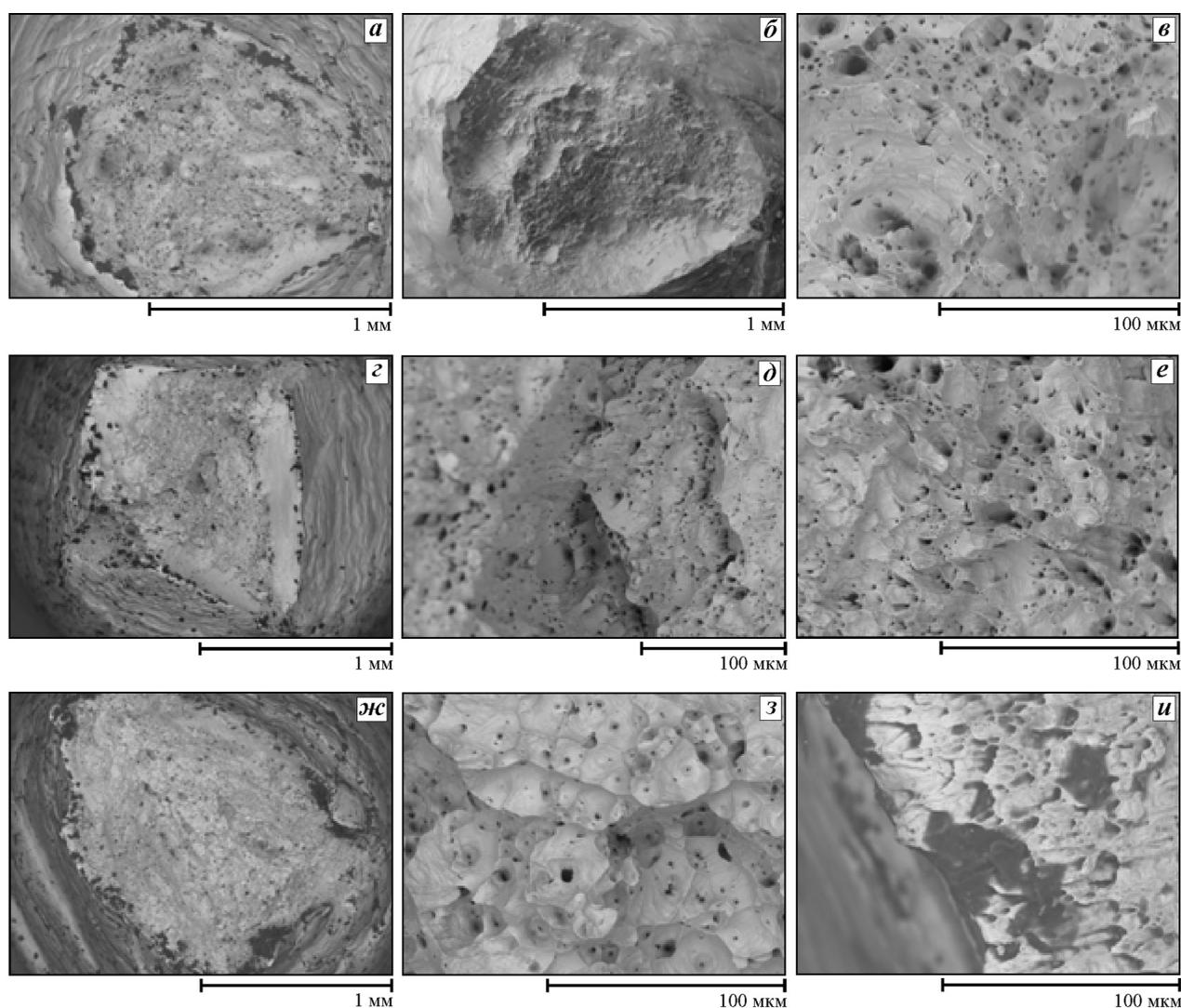


Рис. 4. Макро- и микрорельеф изломов образцов из меди М4, обработанных и испытанных при $T = 293$ К

Состояние поставки – общий вид (а), топограмма (б), центральная зона (в); после экструдирования в 1 проход – общий вид (г), центральная зона (д), периферийная зона (е); после ЭВП в 1 проход – общий вид (ж), центральная зона (з), периферийная зона (и)

ных на разных уровнях и в сумме составляющих ромбическую форму поверхности разрушения. Очаг разрушения находится в центре волокнистой зоны и выделяется в виде выступа/уступа материала в центральной области. Фокус излома меди М4 имеет треугольную форму (см. рис. 4, д). Расположение ямок, как и в случае исходного состояния, хаотичное. Размеры ямок имеют широкий диапазон.

После ЭВП при $T = 293$ К. В данном случае распределение ямок имеет более-менее системный характер. В центральной волокнистой зоне наблюдается ярусное расположение блоков ямок (см. рис. 4, з). Большое количество волнистых линий скольжения на подступах к ямкам свидетельству-

ет о том, что рост ямок произошел путем скольжения материала по многим действующим системам [20]. Ярусное расположение блоков ямок и наличие большого количества линий скольжения, возможно, свидетельствуют о большей сопротивляемости пластическим деформациям и зарождению микротрещин. В зоне боковых скосов излома образца различимы овальные ямки, вытянутые в направлении сдвига (см. рис. 4, и).

Таким образом, изломы в центральной волокнистой и периферийной частях шейки образцов меди М4 сформированы по механизму вязкого разрушения. У образцов в трех различных состояниях разрушение происходит в центральной волокнистой зоне – путем зарождения, роста и сли-

яния микропор, а в периферийной зоне — срезом вдоль полос сдвига. Наблюдаемые на стенках ямок волнистые линии указывают на скольжение материала при росте ямок. Как видно из фрактограмм изломов образцов, размеры ямок меняются в широком диапазоне, что, в свою очередь, зависит от размеров частиц, ответственных за зарождение ямок, расстояний между ними и вязкости разрушения медного образца. Относительно крупные ямки и микроямки присутствуют как в волокнистой зоне, где происходит разрыв перемычек отрывом, так и в периферийной зоне разрушения срезом.

Заключение

Установлено, что медь, обработанная посредством ЭВП в 1 проход при комнатной температуре, обладает большей энергоемкостью, чем экструдированная медь, в связи с некоторым повышением пластичности. Увеличение удельной работы деформаций и удельной работы пластических деформаций (0,752 и 0,731 МДж·м⁻³ соответственно) для меди, подвергнутой ЭВП, составляет ~10÷±12 % по сравнению с исходным материалом (0,677 и 0,66 МДж·м⁻³ соответственно).

Установлен качественно схожий характер разрушения образцов из меди М4 как в исходном, так и в упрочненных состояниях. Во всех случаях наблюдался механизм вязкого разрушения. Тем не менее медь после ЭВП обладает большей энергоемкостью в связи с повышением пластичности. Излом в волокнистой зоне для образца, подвергнутого ЭВП, отличается ярусным расположением блоков ямок. Крупные ямки и микроямки во всех состояниях материала присутствуют как в волокнистой зоне, так и в периферийной зоне среза.

Работа выполнена в рамках проекта № III.28.1.1 Программы № III.28.1 фундаментальных исследований Сибирского отделения РАН.

Литература

1. Valiev R.Z., Langdon T.G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement // *Progr. Mater. Sci.* 2006. Vol. 51. Iss. 7. P. 881—982.
2. Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation // *Progr. Mater. Sci.* 2000. Vol. 45. Iss. 2. P. 103—189.
3. Жолобов В.В., Зверев Г.М. Прессование металлов. М.: Металлургиздат, 1959.
4. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металлов. М.: Металлургия, 1975.
5. Старостин Ю.С. Инновационные технологии на основе прессования: Учеб. пос. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007.
6. Каргин В.Р., Каргин Б.В. Основы технологических процессов ОМД: раздел прессование: Учеб. пос. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011.
7. Helmig R.J., Janacek M., Hadzima B., Gendelman O.V., Shapiro M., Molodova X., Springer A., Estrin Y. A Portrait of copper processed by equal channel angular pressing // *Mater. Trans.* 2008. Vol. 49. No. 1. P. 31—37.
8. Zhang Y., Tao N.R., Lu K. Mechanical properties and rolling behaviors of nano-grained copper with embedded nanotwin bundles // *Acta Mater.* 2008. Vol. 56. Iss. 11. P. 2429—2440.
9. Северденко В.Н., Мурас В.С., Суходрев Э.Ш. Горячее гидродинамическое выдавливание режущего инструмента. Минск: Наука и техника, 1974.
10. Решетов А.В., Кориунов А.И., Смоляков А.А., Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н., Каганова И.И., Морозов А.С. Распределение механических свойств по объему титановой заготовки, обработанной методом винтовой экструзии // *Физика и техника высоких давлений.* 2011. Т. 21. No. 1. С. 111—120.
11. Григорова Т.В., Исаев Н.В., Березина А.Л., Давиденко А.А., Сенникова Л.Ф., Слива К.И., Спусканыук В.З. Влияние комбинированной деформации на низкотемпературную пластичность и прочность субмикроструктурной меди // *Физика и техника высоких давлений.* 2013. Т. 23. No. 4. С. 107—119.
12. Spuskanyuk V., Davydenko O., Berezina A., Gangalo O., Sennikova L., Tikhonovsky M., Spiridonov D. Effect of combining the equal-channel angular hydroextrusion, direct hydroextrusion and drawing on properties of copper wire // *J. Mater. Process. Technol.* 2010. Vol. 210. Iss. 13. P. 1709—1715.
13. Ivanisenko Yu., Kulagin R., Fedorov V., Mazilkin A., Scherrer T., Baretzky B., Hahn H. High pressure torsion extrusion as a new severe plastic deformation process // *Mater. Sci. Eng. A.* 2016. Vol. 664. P. 247—256.
14. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. М.: Академкнига, 2007.
15. Park K-T., Park L., Kim H.J., Kim S.B., Lee C.S. Analysis on dynamic tensile extrusion behavior of UFG OFHC Cu // *IOP conf. Ser.: Materials Science and Engineering.* 2014. Vol. 63. P. 012144. URL: <http://iopscience.iop.org/1757-899X/63/1/012144>.
16. Zehetbauer M.J., Stüwe H.P., Vorhauer A., Schafner E., Kohout J. The role of hydrostatic pressure in severe plastic deformation // *Nanomaterials by severe plastic deforma-*

- tion: Proc. of the 2nd Intern. Conf. on nanomaterials by severe plastic deformation. Fundamentals — Processing — Application (Vienna, Austria, 9—13 Dec. 2002). Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2004. P. 435—446.
17. Wang Y.M., Ma E. Temperature and strain rate effects on the strength and ductility of nanostructured copper // *Appl. Phys. Lett.* 2003. Vol. 83. Iss. 15. P. 3165—3167.
 18. Иванов А.М., Рааб Г.И., Петрова Н.Д. Способ комбинированной интенсивной пластической деформации заготовки: Пат. 2570271 (РФ). 2015.
 19. Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н., Орлов Д.В., Сынков С.Г. Винтовая экструзия — процесс накопления деформации. Донецк: ТЕАН, 2003.
 20. Феллоуз Дж. Фрактография и атлас фрактограмм. М.: Металлургия, 1982.
- ## References
1. Valiev R.Z., Langdon T.G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Progr. Mater. Sci.* 2006. Vol. 51. Iss. 7. P. 881—982.
 2. Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Progr. Mater. Sci.* 2000. Vol. 45. Iss. 2. P. 103—189.
 3. Zholobov V.V., Zverev G.M. Pressovanie metallov [Metal pressing]. Moscow: Metallurgizdat, 1959.
 4. Perlin I.L., Raytbarg L.H. Teoriya pressovaniya metallov [Theory of metal pressing]. Moscow: Metallurgiya, 1975.
 5. Starostin Yu.S. Innovatsionnye tekhnologii na osnove pressovaniya [Innovative technologies on the basis of pressing]. Samara: Izd-vo Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta, 2007.
 6. Kargin V.R., Kargin B.V. Osnovy tekhnologicheskikh protsessov OMD: razdel pressovanie [Fundamentals of metal forming processes: extrusion profile]. Samara: Izd-vo Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta, 2011.
 7. Helmig R.J., Janacek M., Hadzima B., Gendelman O.V., Shapiro M., Molodova X., Springer A., Estrin Y. A Portrait of copper processed by equal channel angular pressing. *Mater. Trans.* 2008. Vol. 49. No. 1. P. 31—37.
 8. Zhang Y., Tao N.R., Lu K. Mechanical properties and rolling behaviors of nano-grained copper with embedded nano-twin bundles. *Acta Mater.* 2008. Vol. 56. Iss. 11. P. 2429—2440.
 9. Severdenko V.N., Muras V.S., Sukhodrev E.Sh. Goryachee gidrodinamicheskoe vydavlivanie rezhushchego instrumenta [Hot hydrodynamic extrusion cutting tool]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1974.
 10. Rechetov A.V., Korshunov A.I., Smolyakov A.A., Beigelzimer Ya.E., Varyukhin V.N., Kaganova I.I., Morozov A.S. Raspredelenie mekhanicheskikh svoystv po ob’emu titanovoi zagotovki, obrabotannoi metodom vintovoi ekstruzii [The distribution of mechanical properties in terms of the titanium billet treated by screw extrusion]. *Fizika i tekhnika vysokikh davlenii.* 2011. Vol. 21. No. 1. P. 111—120.
 11. Grigorova T.V., Isaev N.V., Berezina A.L., Davidenko A.A., Sennikova L.F., Sliva K.I., Spuskanyuk V.Z. Vliyanie kombinirovannoi deformatsii na nizkoterperaturnuyu plastichnost’ i prochnost’ submikrokristallicheskoj medi [Influence of combined deformation in the low-temperature ductility and strength submicrocrystalline copper]. *Fizika i tekhnika vysokikh davlenii.* 2013. Vol. 23. No. 4. P. 107—119.
 12. Spuskanyuk V., Davydenko O., Berezina A., Gangalo O., Sennikova L., Tikhonovsky M., Spiridonov D. Effect of combining the equal-channel angular hydroextrusion, direct hydroextrusion and drawing on properties of copper wire. *J. Mater. Process. Technol.* 2010. Vol. 210. Iss. 13. P. 1709—1715.
 13. Ivanisenko Yu., Kulagin R., Fedorov V., Mazilkin A., Scherer T., Baretzky B., Hahn H. High pressure torsion extrusion as a new severe plastic deformation process. *Mater. Sci. Eng. A.* 2016. Vol. 664. P. 247—256.
 14. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. Ob’yemnye nanostrukturnye metallicheskie materialy: poluchenie, struktura i svoystva [Volume nanostructural metal materials: receiving, structure and properties]. Moscow: Akademkniga, 2007.
 15. Park K-T., Park L., Kim H.J., Kim S.B., Lee C.S. Analysis on dynamic tensile extrusion behavior of UFG OFHC Cu. In: *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering.* 2014. Vol. 63. P. 012144. URL: <http://iopscience.iop.org/1757-899X/63/1/012144>.
 16. Zehetbauer M.J., Stüwe H.P., Vorhauer A., Schafner E., Kohout J. The role of hydrostatic pressure in severe plastic deformation. In: *Nanomaterials by severe plastic deformation: Proc. of the 2nd Intern. Conf. on nanomaterials by severe plastic deformation. Fundamentals — Processing — Application (Vienna, Austria, 9—13 Dec. 2002).* Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2004. P. 435—446.
 17. Wang Y.M., Ma E. Temperature and strain rate effects on the strength and ductility of nanostructured copper. *Appl. Phys. Lett.* 2003. Vol. 83. Iss. 15. P. 3165—3167.
 18. Ivanov A.M., Raab G.I., Petrova N.D. Sposob kombinirovannoi intensivnoi plasticheskoi deformatsii zagotovki [A method of combination severe plastic deformation billet]: Pat. 2570271 (RF). 2015.
 19. Beigelzimer Ya.E., Varyukhin V.N., Orlov D.V., Synkov S.G. Vintovaya ekstruziya — protsess nakopleniya deformatsii [Screw extrusion — deformation accumulation process]. Donetsk: TEAN, 2003.
 20. Fellows J. Fraktografiya i atlas fraktogramm [A fractography and the atlas of fraktogramms]. Moscow: Metallurgiya, 1982.