

Влияние кристаллографической текстуры на прочность и электропроводность ультрамелкозернистой меди

Таров Данила Владимирович*, студент кафедры материаловедения и физики металлов

Нестеров Константин Михайлович, кандидат физико-математических наук,

доцент кафедры материаловедения и физики металлов

Исламгалиев Ринат Кадыханович, доктор физико-математических наук,

профессор кафедры материаловедения и физики металлов

Корзникова Елена Александровна¹, доктор физико-математических наук,

профессор кафедры материаловедения и физики металлов

Уфимский университет науки и технологий, Уфа (Россия)

*E-mail: tarovdv@gmail.com

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5975-4849>

Поступила в редакцию 05.07.2023

Пересмотрена 09.11.2023

Принята к публикации 04.02.2025

Аннотация: Работа посвящена исследованию влияния равноканального углового прессования (РКУП) на структуру, кристаллографическую текстуру, механические свойства и электропроводность меди марки М1, а также зависимости этих характеристик от ориентации направления измерения относительно поперечного сечения (от -45° до 90°). Исследованы удельная электропроводность и прочностные характеристики материала в состоянии поставки (горячекатаного) и влияние отжига при температуре 450°C исходного образца. Проведены механические испытания на одноосное растяжение, исследование микротвердости по методу Виккерса и исследование удельной электропроводности, основанное на измерении параметров вихревого поля, возбуждаемого в поверхностных слоях тела. Установлено, что обработка РКУП приводит к значительному увеличению предела прочности до 425 МПа по сравнению с исходным состоянием 300 МПа. Максимальный предел прочности 425 МПа достигается при углах ориентаций относительно поперечного сечения РКУП -45° . Существенный разброс в повышении микротвердости до значений 1364–1405 МПа, предела прочности до 350–425 МПа и электропроводности до 101,4–102,4 % IACS является следствием выбранных направлений вырезки образцов относительно оси РКУП. Это свидетельствует о зависимости не только механических, но и электрических свойств ультрамелкозернистых образцов от ориентации кристаллографической текстуры. Наиболее оптимальной кристаллографической ориентировкой обладает образец меди марки М1, подвергнутый РКУП с углом реза, отступающим от поперечного сечения РКУП образца на $7,5^\circ$. В данном случае значения микротвердости и электропроводности достигали 1405 МПа и 102,4 % IACS соответственно.

Ключевые слова: кристаллографическая текстура; прочность; электропроводность; ультрамелкозернистая медь; равноканальное угловое прессование; структура.

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Исследование физико-химических и механических процессов при формообразовании и упрочнении деталей для авиакосмической и транспортной техники» № FEUE-2023-0006.

Статья подготовлена по материалам докладов участников XI Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2023), Тольятти, 11–15 сентября 2023 года.

Для цитирования: Таров Д.В., Нестеров К.М., Исламгалиев Р.К., Корзникова Е.А. Влияние кристаллографической текстуры на прочность и электропроводность ультрамелкозернистой меди // Frontier Materials & Technologies. 2025. № 1. С. 81–91. DOI: 10.18323/2782-4039-2025-1-71-7.

ВВЕДЕНИЕ

Медь и низколегированные медные сплавы, благодаря высокой электропроводности, широко применяются в машиностроении для изготовления контактов и проводов. Детали из меди должны обладать уникальным сочетанием свойств: высокой электропроводностью, прочностью, пластичностью, коррозионной стойкостью. Хорошие технологические свойства и сравнительно низкая стоимость обуславливают широкое применение меди в промышленности как в виде сплавов, так и в чистом виде. В работе [1] показано, что механическая прочность и электропроводность этих материалов в первую очередь контролируются их микроструктурой, наиболее важными параметрами которой явля-

ются размер зерна, а также дислокационная структура. Дислокации и границы зерен вносят большой вклад в повышение предела текучести, но меньший – в повышение удельного электрического сопротивления [2].

В последние годы перспективным научным направлением исследований является формирование ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры со средним размером зерен менее 1 мкм, что способствует проявлению уникальных механических свойств (высокой прочности, повышенного предела выносливости) [3; 4]. Вместе с тем известно, что обработка методами интенсивной пластической деформации (ИПД) сопровождается активным движением дислокаций и двойникованием, что приводит к переориентации зерен и формированию развитых

кристаллографических текстур [5; 6]. Кристаллографическая текстура обычно возникает в результате направленного внешнего механического воздействия, в данном случае – процесса ИПД. Наличие преимущественной ориентировки усиливает анизотропию свойств материала и может существенно изменить эксплуатационные характеристики изделия. Поэтому возможность образования текстуры следует учитывать при проведении различных деформационно-термических обработок [7]. В частности, в образцах чистой меди, подвергнутой ИПД, было обнаружено, что на начальных стадиях деформации происходит формирование сильной преимущественной ориентации кристаллитов, характерной для текстуры простого сдвига [5]. При этом увеличение степени накопленной деформации способствует размытию текстурных максимумов, что вызывает интерес для изучения влияния кристаллографической текстуры на прочностные и электрические свойства УМЗ меди.

Известны работы, в которых рассмотрено влияние кристаллографической текстуры на прочность и электропроводность УМЗ меди, полученной методами ротационнойковки [8] и электроосаждения [9], но в них исследования проведены на примере образцов в виде проволоки или пленок, имеющих другую кристаллографическую текстуру.

Цель исследования – анализ структуры и кристаллографической текстуры в ультрамелкозернистых образцах меди марки М1, полученных методом равноканального углового прессования (РКУП), для выявления структурных факторов, ведущих к достижению более высокой прочности при сохранении высокой электропроводности материала.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы и методы исследования

В качестве материала для исследований был выбран медный промышленный прутки диаметром 20 мм марки М1 ГОСТ 859-2001 (таблица 1).

Для анализа исходной микроструктуры были исследованы 2 образца, один из которых был в состоянии поставки – горячекатаный. Образец в исходном состоянии подвергли отжигу при 450 °С в течение 2 ч. Перед отжигом исходный образец погружали в расплав смеси солей КОН и NaOH для предотвращения окисления поверхности материала.

Формирование УМЗ структуры в заготовке диаметром 20 мм и длиной 150 мм проводили методом РКУП в 8 проходов по маршруту В_с, который подразумевает

поворот образца между 2 последующими циклами против часовой стрелки на угол 90° вокруг продольной оси [6]. Проходы заготовок осуществлялись на оснастке с углом пересечения каналов 120° при температуре 20 °С.

Подготовка образцов для металлографического анализа включала в себя вырезку образцов (рис. 1) на электроэрозионном отрезном станке АРТА-120 с учетом углов относительно поперечного сечения РКУП заготовки (0°; 7,5°; ±15°; ±22,5°; ±45°; 90°), шлифовку, полировку и травление.

Шлифование образцов проводилось на шлифовально-полировальном станке «НЕРИС» со ступенчатым снижением зернистости шлифовальной бумаги с Р100 до Р4000 при оборотах станка 500–600 об/мин.

Полирование проводилось на алмазной пасте с постепенным уменьшением ее зернистости от 7/5 до 3/2. При переходе к последующему номеру пасты со шлифа тщательно удалялись остатки пасты при помощи спирта, а направление полировки изменяли на 90° для гарантированного полного исчезновения рисок, нанесенных предыдущей пастой.

Для выявления структуры микрошлифа образец подвергали травлению. Состав травителя: хлорная кислота (HCl) – 50 %, азотная кислота (HNO₃) – 25 %, уксусная кислота (CH₃COOH) – 25 %. Режим травления подбирался экспериментально. Образец травил 2–3 с с окунанием в травитель, затем промывали дистиллированной водой и просушивали фильтровальной бумагой.

Структурные исследования

Фотографии микроструктуры были получены на сканирующем электронном микроскопе JEM-6390 и просвечивающем электронном микроскопе JEM-2100. Тонкие фольги подготавливались на установке TenuPol-5 методом струйной электролитической полировки при напряжении 22–24 В с использованием электролита следующего состава: 920 мл воды (H₂O), 70 мл ортофосфорной кислоты (H₃PO₄), 15 мл глицерина (C₃H₅(OH)₃). Структуру РКУП образцов исследовали в поперечном сечении. По полученным снимкам структуры подсчитывали размер зерна в программе GrainSize.

Образец меди М1 после обработки методом РКУП срезали со следующими ориентировками (углами) относительно поперечного сечения РКУП заготовки: 0°; 7,5°; ±15°; ±22,5°; ±45°; 90°; толщина 1,5–2,5 мм, диаметр 20 мм. Анализ процессов текстурообразования в меди выполнен с использованием дифрактометра ДРОН-3м, оснащенного автоматической текстурной приставкой. При съемке плоских фигур использовалось фильтрованное рентгеновское излучение Cu-K_{α1} (0,15406 нм). Съемка на отражение

Таблица 1. Химический состав меди марки М1
Table 1. Chemical composition of copper grade Cu-ETP

Содержание, %											
Cu	Fe	O	Pb	S	Zn	Ag	Sb	As	Ni	Sn	Bi
99,9	≤0,005	≤0,05	≤0,005	≤0,004	≤0,004	≤0,003	≤0,002	≤0,002	≤0,002	≤0,002	≤0,001

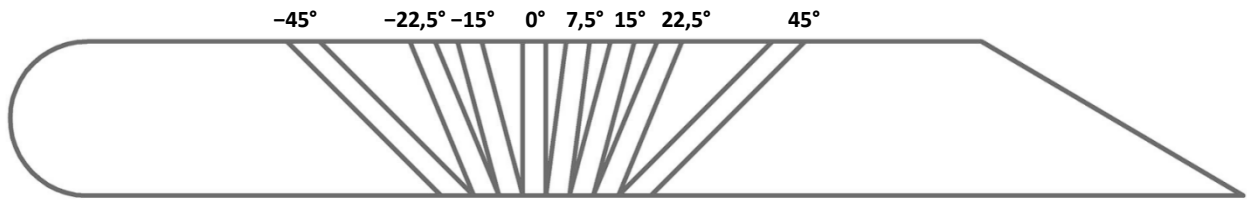


Рис. 1. Схема ориентаций вырезки РКУП образцов
Fig. 1. Scheme of orientations of cutting ECAP samples

проводилась в пределах изменения радиального угла γ от 0 до 75° и азимутального угла δ от 0 до 360° . Диаметр облучаемой области соответствовал 0,6 мм. В случае РКУП исследование проводилось в геометрическом центре продольного сечения заготовки. В результате получили набор интенсивностей отраженных рентгеновских лучей. Результаты экспериментальных исследований, рассчитанные с использованием пакета программ LaboTEX (www.labosoft.com.pl), представлены в виде полных полюсных фигур в плоскости сдвига.

Исследование микротвердости

Измерения проводились на установке MicroMet 5101 по методу Виккерса в поперечном сечении РКУП образцов под нагрузкой 100 г, время выдержки индентора – 10 с. Результаты фиксировались вдоль диаметра образцов.

Исследование электропроводности

Удельная электропроводность определялась при комнатной температуре вихретоковым методом с использованием прибора ВЭ-27НЦ с относительной погрешностью измерения 2 %. Отожженной чистой меди, имеющей электропроводность 58 МСм/м (электросопротивление 0,017241 мкОм·м), по международному стандарту IACS (International Annealed Copper Standard) соответствует обозначение 100 % IACS. Результаты измерений электропроводности в настоящей работе представлены в % IACS, т. е. в процентах от электропроводности чистой меди.

Испытания на одноосное растяжение

Испытания проводились на установке для деформации малых образцов при комнатной температуре со скоростью $3 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. В каждом состоянии испытывались по два образца с размерами рабочей базы 6,0×1,0×0,7 мм (рис. 2), вырезанные из исходной, отожженной и РКУП заготовок.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полученные изображения микроструктуры представлены на рис. 3. Исходная структура меди марки М1 состоит из крупных зерен неправильной формы со средним размером 7 ± 4 мкм (рис. 3 а). На гистограмме распределения зерен показано, что большее количество зерен расположено в интервале 2,5–10 мкм (рис. 3 б). Значение микротвердости исходного образца равно 1211 ± 65 МПа, значение электропроводности составило $101,3 \pm 1,36$ % IACS. Такие значения электропроводности получились из-за присутствия относительной погрешности измерительного прибора, поэтому для верного проведения эксперимента и возможного сравнения результатов было взято значение, полученное при помощи прибора ВЭ-27НЦ.

После термической обработки при 450°C размер зерна увеличился до $10,2 \pm 2,3$ мкм (рис. 3 с). На гистограмме распределения зерен видно, что большее количество зерен расположено в интервале 5,5–15,5 мкм (рис. 3 д). Значение микротвердости равно 773 ± 37 МПа, а электропроводности – $102,2 \pm 1,79$ % IACS.

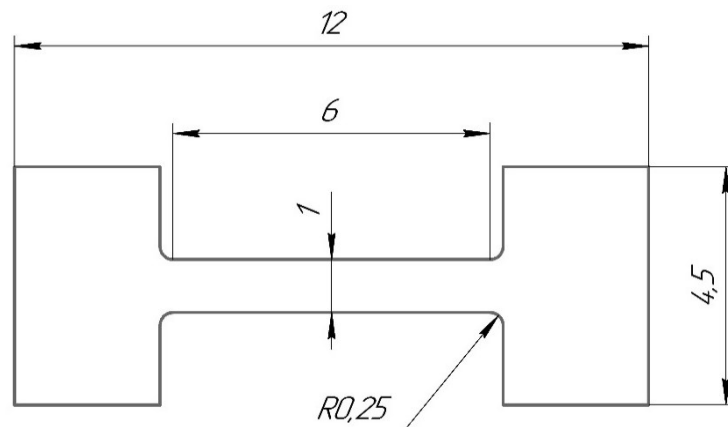


Рис. 2. Геометрия образца для механических испытаний на растяжение
Fig. 2. The geometry of a specimen for mechanical tensile testing

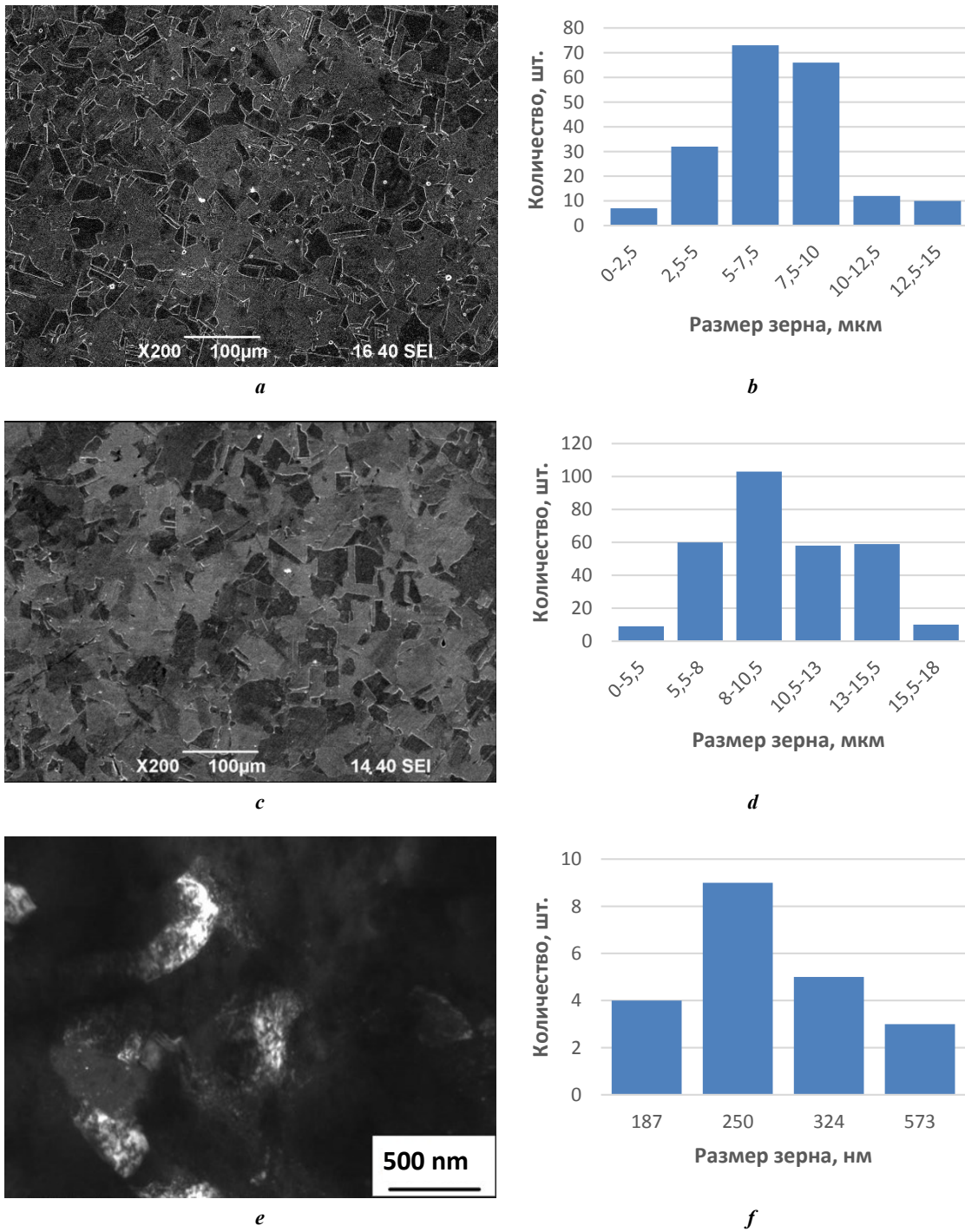


Рис. 3. Результаты микроскопии и расчета размеров зерна:
a – структура исходного образца; **b** – размер зерна (исходный образец);
c – микроструктура отожженного образца; **d** – размер зерна (отожженный образец);
e – темнопольное изображение ПЭМ меди (ПКУП); **f** – размер зерна (ПКУП)
Fig. 3. Results of microscopy and grain size calculation:
a – structure of the initial sample; **b** – grain size (initial sample);
c – microstructure of the annealed sample; **d** – grain size (annealed sample);
e – dark-field TEM image of copper (ECAP); **f** – grain size (ECAP)

После обработки РКУП размер зерна уменьшился в среднем до 300 нм (рис. 3 е). На гистограмме распределения зерен показано, что большее количество зерен расположено в интервале 250–324 нм (рис. 3 ф).

В результате текстурного анализа были получены прямые полюсные фигуры (рис. 4), которые для дальнейшего анализа были перестроены с поворотом на 90° по экваториальной плоскости (рис. 5). После 8 проходов РКУП при $T=20^\circ\text{C}$ на полюсной фигуре (111) видны ярко выраженные максимумы, характер расположения которых довольно упорядочен (рис. 5). Кристаллографическую текстуру после 8 проходов РКУП можно описать с помощью идеальных ориентировок (рис. 6), соответствующих состоянию после простого сдвига с учетом поворота на угол 60° против часовой стрелки. Полюсная фигура (111) характеризуется набором из 7 максимумов (рис. 5 d): 6 максимумов симметрично расположены на периферии полюсной фигуры и 1 – в ее центре. Эти максимумы соответствуют компонентам $A \{111\}\langle uvw \rangle$, $B \{hkl\}\langle 110 \rangle$ и $C \{001\}\langle 110 \rangle$ текстуры простого сдвига. Их интенсивность увеличивается с увеличением угла среза (от 0 до 22°).

Кристаллографические текстуры всех сечений медного образца, подвергнутого 8 проходам РКУП, идентичны и характеризуются доминирующими компонентами $\{110\}\langle 111 \rangle$ (рис. 5). В то же время полюсные фигуры, полученные для различных сечений, характеризуются тем, что максимумы $A_{1\theta}^*$, $A_{2\theta}^*$ и C_θ , расположенные на периферии полюсной фигуры, при увеличении угла среза смещаются к ее центру. В целом, окончательно сформировавшаяся текстура может быть описана основными текстурными максимумами $(111)[\bar{1}\bar{1}2]$, $(111)[11\bar{2}]$, $(\bar{1}\bar{1}1)[110]$, $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})[\bar{1}\bar{1}0]$, $(\bar{1}\bar{1}2)[110]$, $(\bar{1}12)[\bar{1}\bar{1}0]$ и $(001)[110]$, характерными для текстур простого сдвига.

Указанные идеальные ориентировки A_θ , $A_{1\theta}^*$, $A_{2\theta}^*$, \bar{A}_θ , B_θ , \bar{B}_θ и C_θ лежат на фибрах $\{111\}_\theta$ и $\langle 110 \rangle_\theta$ (рис. 6). Для полюсной фигуры (111), полученной для среза $7,5^\circ$, наблюдается наложение текстуры рекристаллизации на текстуру простого сдвига (рис. 5 b и 6 b). Процесс рекристаллизации связан с поглощением старых зерен новыми равноосными зернами с большеугловыми границами. Он активизируется при достижении определенной степени деформации. В рассматриваемом случае помимо компоненты текстуры простого сдвига на полюсной фигуре (111) наблюдается формирование доминирующих компонент $R1(\bar{1}\bar{1}1)[113]$, $R2(120)[\bar{2}11]$, $R3(023)[3\bar{3}2]$ и $R4(\bar{1}22)[\bar{2}21]$, характерных для текстуры рекристаллизации (рис. 6 b).

В сечениях 15° и $22,5^\circ$ наблюдается нарушенная симметрия кристаллической структуры. Сечение 0° соответствует кристаллической текстуре простого сдвига ГЦК решетки металла. В сечении $7,5^\circ$ расположение текстурных максимумов соответствует абсолютно симметричной картине кристаллической структуры, что указывает на ее наибольшую упорядоченность и объясняет наивысшую электропроводность (рис. 4).

Получены кривые механических испытаний для исходного, отожженного исходного (рис. 7 а) и подвергнутого РКУП образцов (рис. 7 б). После отжига исходных образцов произошло снижение предела прочности

с 300 до 210 МПа вследствие увеличения среднего размера зерна, а также повышение пластичности за счет увеличения стадии деформационного упрочнения (рис. 7 а). В РКУП образцах наблюдались различные значения предела прочности в диапазоне от 330 до 425 МПа в зависимости от угла вырезки по отношению к оси РКУП (рис. 7 б). При этом все исследованные образцы показали близкие значения относительного удлинения до разрушения примерно 5%. На рис. 8, 9 видны изменения микротвердости, предела прочности и электропроводности в зависимости от направления вырезки образцов относительно оси РКУП, что свидетельствует о сильном влиянии кристаллографической текстуры на эти характеристики образцов. Максимальный (425 МПа) и минимальный (330 МПа) пределы прочности наблюдали при углах ориентаций относительно поперечного сечения РКУП -45° и 15° соответственно. Наибольшие значения микротвердости и электропроводности наблюдались при $7,5^\circ$ – 1405 МПа и 102,4 % IACS соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Повышение прочностных свойств меди М1 после измельчения зеренной структуры уже наблюдалось в литературе на примере УМЗ образцов, полученных ИПД [10; 11]. Оно может быть объяснено известным соотношением Холла – Петча [12; 13], описывающим зависимость предела текучести от среднего размера зерна. В работе [14] было отмечено, что для достижения сочетания высокой прочности и хорошей электропроводности в медных материалах достаточно измельчения зерна до среднего размера 200 нм. В настоящей работе в РКУП образцах наблюдался близкий средний размер зерна 300 нм, а также высокий предел прочности 425 МПа, близкий к значению 450 МПа, наблюдавшимся ранее в РКУП образцах чистой меди [15].

Сочетание повышенных значений прочности и электропроводности отмечалось также на примере УМЗ образцов меди, полученных электроосаждением [17], множественной прокаткой [18] и волочением [19], для которых было характерно наличие кристаллографической текстуры. Особенности кристаллографической текстуры в РКУП образцах меди исследовались в [20; 21]. В работе [20] отмечено, что существует градиент текстуры в различных направлениях РКУП образцов, что может создавать в них анизотропию механических свойств. В работе [21] продемонстрировано, что электропроводность РКУП меди подвержена воздействию различных структурных факторов, включая ориентацию зерен и кристаллографическую текстуру. В настоящей работе показано, что различие в прочности и электропроводности РКУП образцов меди относительно разных кристаллографических направлений может достигать 20–30 и 2–3 % соответственно.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Структура меди марки М1 в исходном состоянии представлена зернами неправильной формы со средним размером 7 мкм, последующий отжиг при 450°C приводит к увеличению размера зерна до 10,2 мкм. После обработки методом РКУП размер зерна уменьшился до 300 нм.

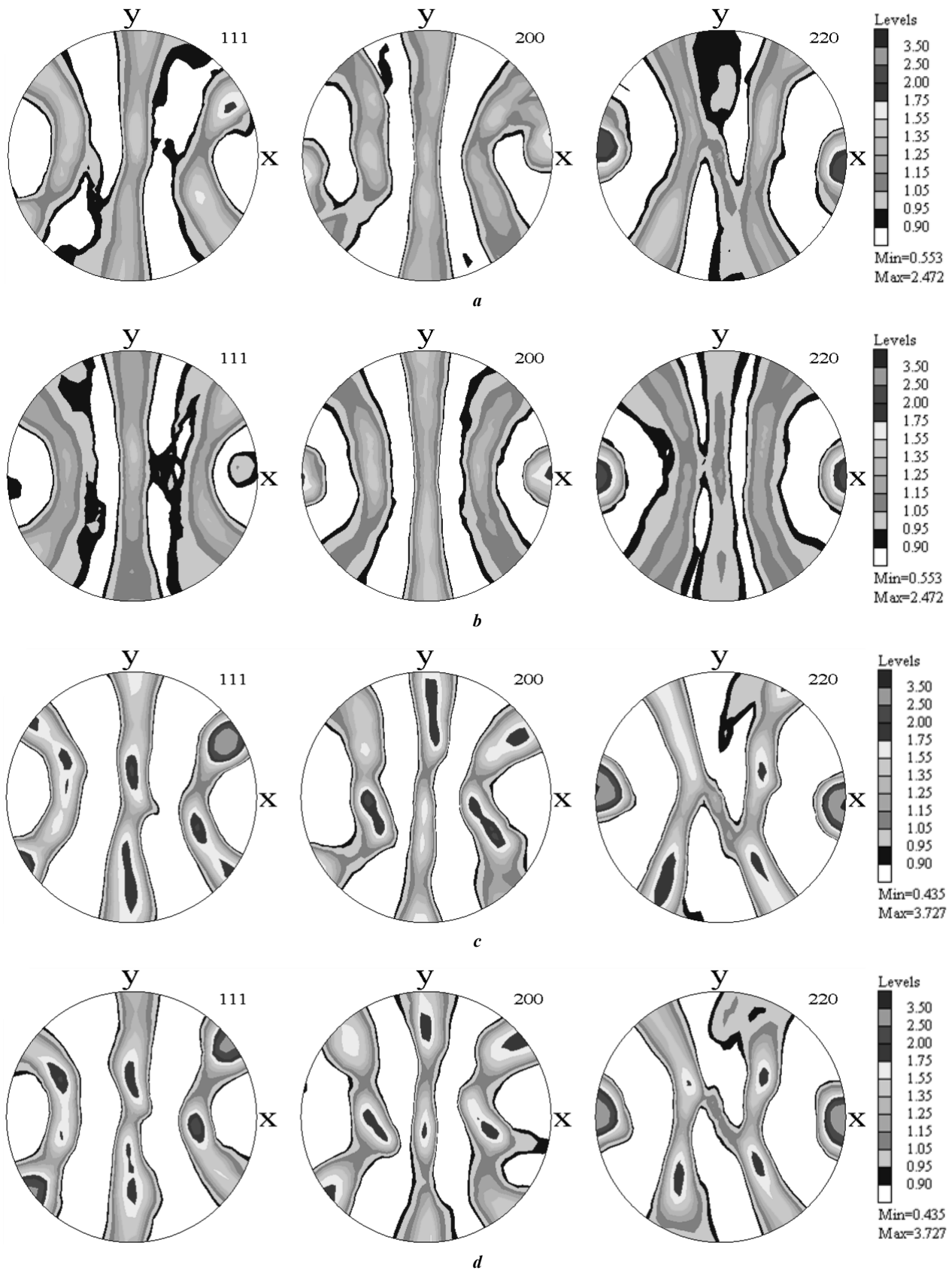


Рис. 4. Прямые полюсные фигуры меди после 8 проходов РКВП в различных сечениях:
 a – 0°; b – 7,5°; c – 15°; d – 22,5°

Fig. 4. Direct pole figures of copper after eight ECAP passes in different sections:
 a – 0°; b – 7.5°; c – 15°; d – 22.5°

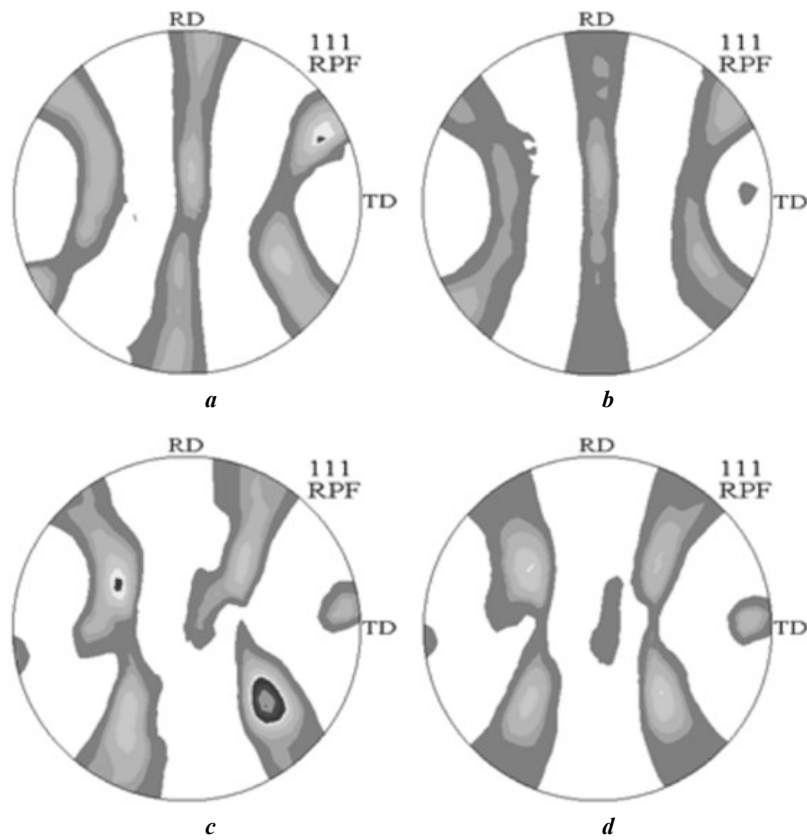


Рис. 5. Перестроенные прямые полюсные фигуры в различных исследованных состояниях:
a – 0°; *b* – 7,5°; *c* – 15°; *d* – 22,5°

Fig. 5. Rearranged direct pole figures in different studied states:
a – 0°; *b* – 7.5°; *c* – 15°; *d* – 22.5°

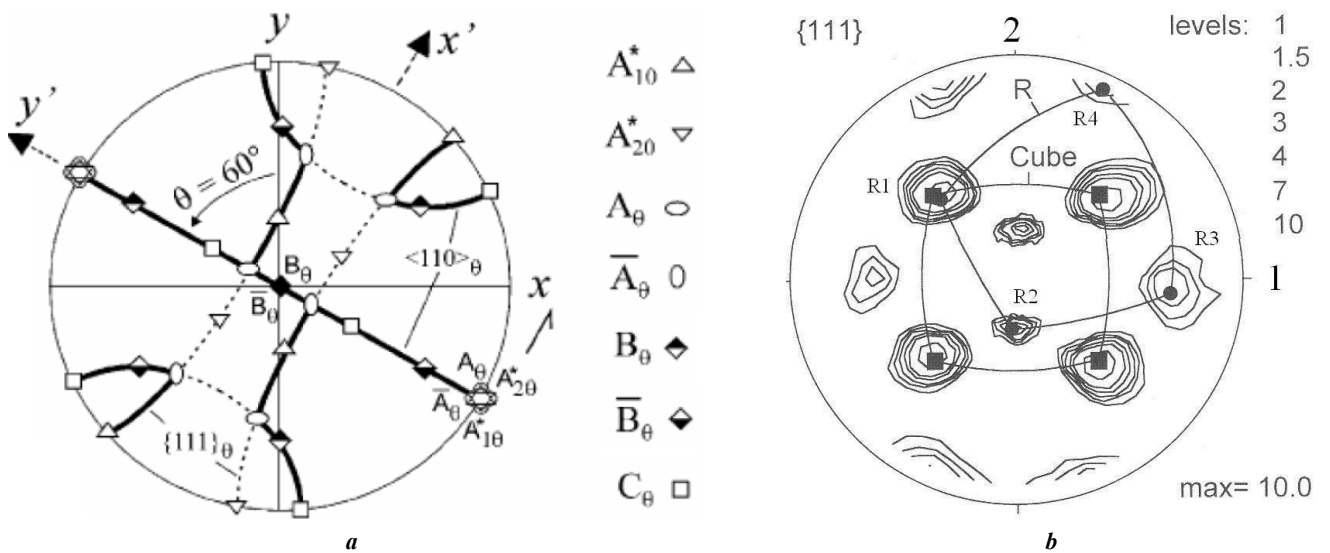
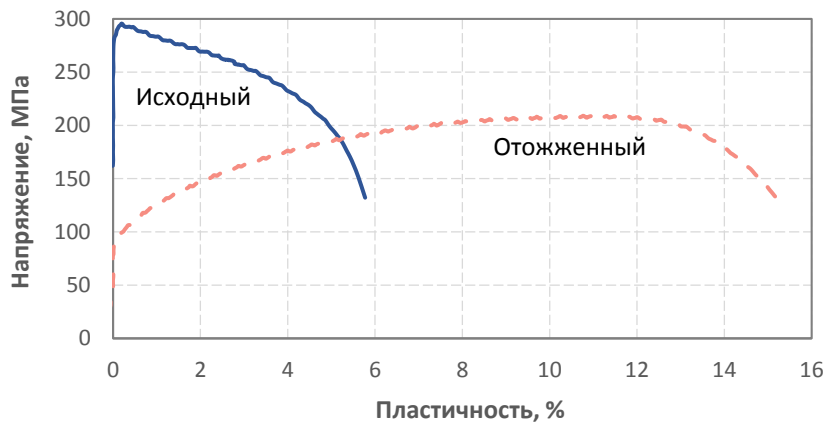


Рис. 6. Положения идеальных ориентировок, соответствующих состоянию после простого сдвига с учетом поворота на угол 60° против часовой стрелки:

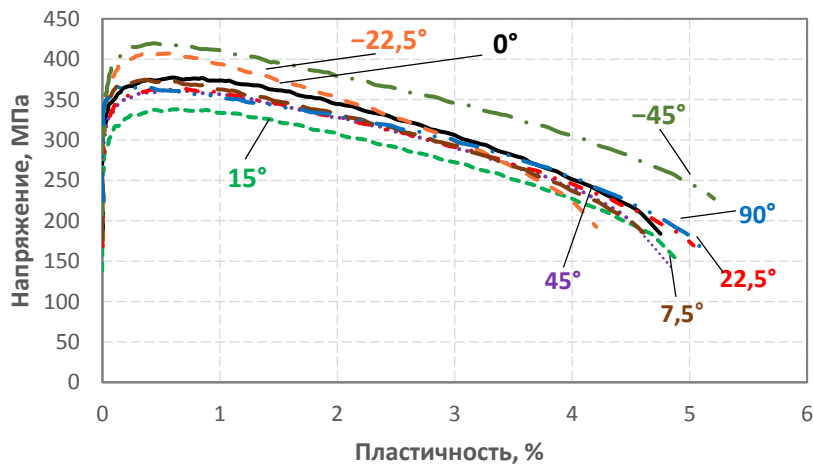
a – кубическая ориентировка; *b* – R-ориентировка

Fig. 6. Positions of ideal orientations corresponding to the state after a simple shear taking into account a rotation by an angle of 60° counterclockwise:

a – cubic orientation; *b* – R-orientation



a



b

Рис. 7. Кривые механических испытаний образцов:

a – исходного и отожженного;

b – вырезанных при различных сечениях из РКУП заготовки

Fig. 7. Curves of mechanical tests of samples:

a – initial and annealed; *b* – cut at different cross-sections from ECAP billet

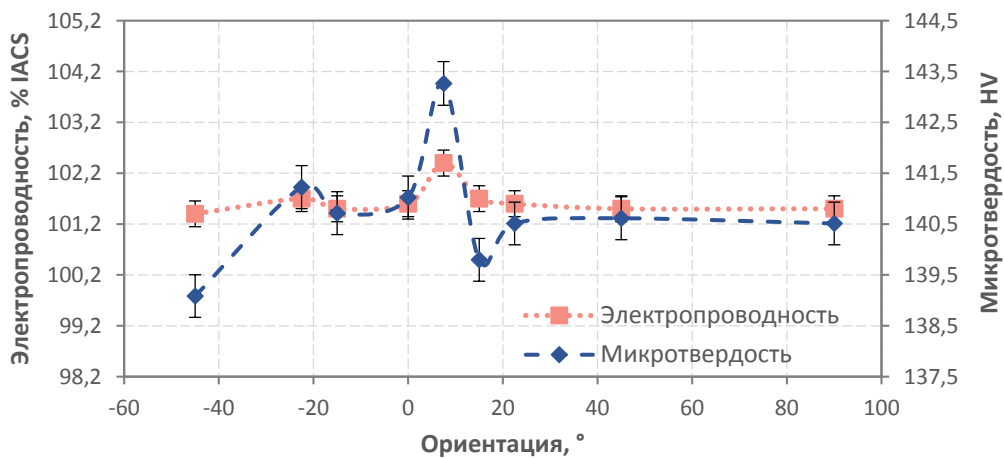


Рис. 8. Кривые зависимости от угла ориентации микротвердости и электропроводности

Fig. 8. Orientation angle dependence curves microhardness and electrical conductivity

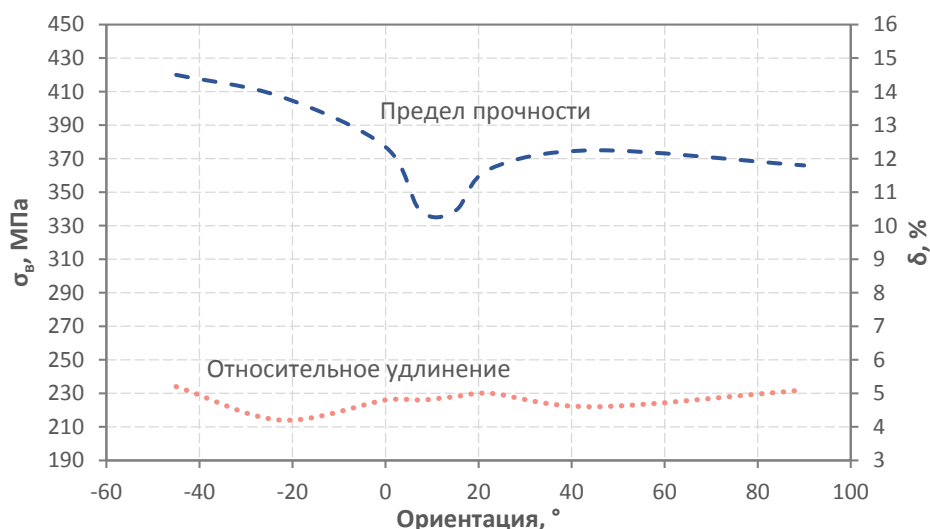


Рис. 9. Кривые зависимости от угла ориентации прочности и удлинения
 Fig. 9. Orientation angle dependence curves strength and elongation

Обработка РКУП привела к значительному увеличению предела прочности по сравнению с исходным состоянием (300 МПа). Максимальный (425 МПа) и минимальный (350 МПа) пределы прочности наблюдали при углах ориентаций относительно поперечного сечения РКУП -45° и 15° соответственно.

2. Существенная зависимость изменения микротвердости (1364–1405 МПа), предела прочности (350–425 МПа) и электропроводности (101,4–102,4 % IACS) от направлений вырезки образцов относительно оси РКУП свидетельствует о сильном влиянии кристаллографической текстуры не только на механические, но и на электрические свойства УМЗ образцов. Наиболее благоприятной кристаллографической ориентировкой обладает образец меди марки М1 с углом реза, отступающим от поперечного сечения РКУП образца на $7,5^\circ$. В данном случае значения микротвердости и электропроводности достигали 1405 МПа и 102,4 % IACS соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Murashkin M.Y., Sabirov I., Sauvage X., Valiev R.Z. Nanostructured Al and Cu alloys with superior strength and electrical conductivity // *Journal of Materials Science*. 2016. Vol. 51. P. 33–49. DOI: [10.1007/s10853-015-9354-9](https://doi.org/10.1007/s10853-015-9354-9).
- Fu Qianqian, Li Bing, Gao Minqiang, Fu Ying, Yu Rongzhou, Wang Changfeng, Guan Renguo. Quantitative mechanisms behind the high strength and electrical conductivity of Cu-Te alloy manufactured by continuous extrusion // *Journal of Materials Science & Technology*. 2022. Vol. 121. P. 9–18. DOI: [10.1016/j.jmst.2021.12.046](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.12.046).
- Fan G.J., Choo H., Liaw P.K., Lavernia E.J. Plastic deformation and fracture of ultrafine-grained Al–Mg alloys with a bimodal grain size distribution // *Acta Materialia*. 2006. Vol. 54. № 7. P. 1759–1766. DOI: [10.1016/j.actamat.2005.11.044](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.11.044).
- Cui Lang, Shao Shengmin, Wang Haitao, Zhang Guoqing, Zhao Zejia, Zhao Chunyang. Recent Advances in the Equal Channel Angular Pressing of Metallic Materials // *Processes*. 2022. Vol. 10. № 11. Article number 2181. DOI: [10.3390/pr10112181](https://doi.org/10.3390/pr10112181).
- Mao Qingzhong, Zhang Yusheng, Guo Yazhou, Zhao Yonghao. Enhanced electrical conductivity and mechanical properties in thermally stable fine-grained copper wire // *Communications Materials*. 2021. № 2. Article number 46. DOI: [10.1038/s43246-021-00150-1](https://doi.org/10.1038/s43246-021-00150-1).
- Damavandi E., Nourouzi S., Rabiee S.M., Jamaati R., Szpunar J.A. Effect of route BC-ECAP on microstructural evolution and mechanical properties of Al–Si–Cu alloy // *Journal of Materials Science*. 2021. Vol. 56. P. 3535–3550. DOI: [10.1007/s10853-020-05479-5](https://doi.org/10.1007/s10853-020-05479-5).
- Beyerlein I.J., Toth L.S. Texture evolution in equal-channel angular extrusion // *Progress in Materials Science*. 2009. Vol. 54. № 4. P. 427–510. DOI: [10.1016/j.pmatsci.2009.01.001](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2009.01.001).
- Alateyah A.I., Ahmed M.M.Z., Zedan Y., El-Hafez H.A., Alawad M.O., El-Garaihy W.H. Experimental and Numerical Investigation of the ECAP Processed Copper: Microstructural Evolution, Crystallographic Texture and Hardness Homogeneity // *Metals*. 2021. Vol. 11. № 4. Article number 607. DOI: [10.3390/met11040607](https://doi.org/10.3390/met11040607).
- Chen Jianqing, Su Yehan, Zhang Qiyu, Sun Jiapeng, Yang Donghui, Jiang Jinghua, Song Dan, Ma Aibin. Enhancement of strength-ductility synergy in ultrafine-grained Cu-Zn alloy prepared by ECAP and subsequent annealing // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 17. № 2. P. 433–440. DOI: [10.1016/j.jmrt.2022.01.026](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.026).
- Wang Y.M., Ma E. Three strategies to achieve uniform tensile deformation in a nanostructured metal // *Acta Materialia*. 2004. Vol. 52. № 6. P. 1699–1709. DOI: [10.1016/j.actamat.2003.12.022](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2003.12.022).
- Zhao Yong-Hao, Bingert J.F., Liao Xiao-Zhou et al. Simultaneously increasing the ductility and strength of ultrafine-

- grained pure copper // *Advanced Materials*. 2006. Vol. 18. № 22. P. 2949–2953. DOI: [10.1002/adma.200601472](https://doi.org/10.1002/adma.200601472).
12. Sanders P.G., Eastman J.A., Weertman J.R. Elastic and tensile behavior of nanocrystalline copper and palladium // *Acta Materialia*. 1997. Vol. 45. № 10. P. 4019–4025. DOI: [10.1016/S1359-6454\(97\)00092-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(97)00092-X).
 13. Fu H.H., Benson D.J., Meyers M.A. Analytical and computational description of effect of grain size on yield stress of metals // *Acta Materialia*. 2001. Vol. 49. № 13. P. 2567–2582. DOI: [10.1016/S1359-6454\(01\)00062-3](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00062-3).
 14. Lu Lei, Shen Yongfeng, Chen Xianhua, Qian Lihua, Lu K. Ultrahigh strength and high electrical conductivity in copper // *Science*. 2004. Vol. 304. № 5669. P. 422–426. DOI: [10.1126/science.1092905](https://doi.org/10.1126/science.1092905).
 15. Islamgaliev R.K., Nesterov K.M., Bourgon J., Champion Y., Valiev R.Z. Nanostructured Cu-Cr alloy with high strength and electrical conductivity // *Journal of Applied Physics*. 2014. Vol. 115. № 19. Article number 194301. DOI: [10.1063/1.4874655](https://doi.org/10.1063/1.4874655).
 16. Dalla Torre F., Lapovok R., Sandlin J., Thomson P.F., Davies C.H.J., Pereloma E.V. Microstructures and properties of copper processed by equal channel extrusion for 1-16 passes // *Acta Materialia*. 2004. Vol. 52. № 16. P. 4819–4832. DOI: [10.1016/j.actamat.2004.06.040](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.06.040).
 17. Sarada B.V., Pavithra Ch.L.P., Ramakrishna M., Rao T.N., Sundararajan G. Highly (111) textured copper foils with high hardness and high electrical conductivity by pulse reverse electrodeposition // *Electrochemical and Solid-State Letters*. 2010. Vol. 13. № 6. P. D40–D42. DOI: [10.1149/1.3358145](https://doi.org/10.1149/1.3358145).
 18. Takata N., Lee Seong-Hee, Tsuji N. Ultrafine grained copper alloy sheets having both high strength and high electric conductivity // *Materials Letters*. 2009. Vol. 63. № 21. P. 1757–1760. DOI: [10.1016/j.matlet.2009.05.021](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2009.05.021).
 19. Hanazaki K., Shigeiri N., Tsuji N. Change in microstructures and mechanical properties during deep wire drawing of copper // *Materials Science and Engineering: A*. 2010. Vol. 527. № 21-22. P. 5699–5707. DOI: [10.1016/j.msea.2010.05.057](https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.05.057).
 20. Skrotzki W., Tränkner C., Chulist R., Beausir B., Suwas S., Tóth L.S. Texture heterogeneity in ECAP deformed copper // *Solid State Phenomena*. 2010. Vol. 160. P. 47–54. DOI: [10.4028/www.scientific.net/SSP.160.47](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.160.47).
 21. Guo Tingbiao, Wei Shiru, Wang Chen, Li Qi, Jia Zhi. Texture evolution and strengthening mechanism of single crystal copper during ECAP // *Materials Science and Engineering: A*. 2019. Vol. 759. P. 97–104. DOI: [10.1016/j.msea.2019.05.042](https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.05.042).
 3. Fan G.J., Choo H., Liaw P.K., Lavernia E.J. Plastic deformation and fracture of ultrafine-grained Al–Mg alloys with a bimodal grain size distribution. *Acta Materialia*, 2006, vol. 54, no. 7, pp. 1759–1766. DOI: [10.1016/j.actamat.2005.11.044](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.11.044).
 4. Cui Lang, Shao Shengmin, Wang Haitao, Zhang Guoqing, Zhao Zejia, Zhao Chunyang. Recent Advances in the Equal Channel Angular Pressing of Metallic Materials. *Processes*, 2022, vol. 10, no. 11, article number 2181. DOI: [10.3390/pr10112181](https://doi.org/10.3390/pr10112181).
 5. Mao Qingzhong, Zhang Yusheng, Guo Yazhou, Zhao Yonghao. Enhanced electrical conductivity and mechanical properties in thermally stable fine-grained copper wire. *Communications Materials*, 2021, no. 2, article number 46. DOI: [10.1038/s43246-021-00150-1](https://doi.org/10.1038/s43246-021-00150-1).
 6. Damavandi E., Nourouzi S., Rabiee S.M., Jamaati R., Szpunar J.A. Effect of route BC-ECAP on microstructural evolution and mechanical properties of Al–Si–Cu alloy. *Journal of Materials Science*, 2021, vol. 56, pp. 3535–3550. DOI: [10.1007/s10853-020-05479-5](https://doi.org/10.1007/s10853-020-05479-5).
 7. Beyerlein I.J., Toth L.S. Texture evolution in equal-channel angular extrusion. *Progress in Materials Science*, 2009, vol. 54, no. 4, pp. 427–510. DOI: [10.1016/j.pmatsci.2009.01.001](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2009.01.001).
 8. Alateyah A.I., Ahmed M.M.Z., Zedan Y., El-Hafez H.A., Alawad M.O., El-Garaihy W.H. Experimental and Numerical Investigation of the ECAP Processed Copper: Microstructural Evolution, Crystallographic Texture and Hardness Homogeneity. *Metals*, 2021, vol. 11, no. 4, article number 607. DOI: [10.3390/met11040607](https://doi.org/10.3390/met11040607).
 9. Chen Jianqing, Su Yehan, Zhang Qiyu, Sun Jiapeng, Yang Donghui, Jiang Jinghua, Song Dan, Ma Aibin. Enhancement of strength-ductility synergy in ultrafine-grained Cu-Zn alloy prepared by ECAP and subsequent annealing. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 17, no. 2, pp. 433–440. DOI: [10.1016/j.jmrt.2022.01.026](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.026).
 10. Wang Y.M., Ma E. Three strategies to achieve uniform tensile deformation in a nanostructured metal. *Acta Materialia*, 2004, vol. 52, no. 6, pp. 1699–1709. DOI: [10.1016/j.actamat.2003.12.022](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2003.12.022).
 11. Zhao Yong-Hao, Bingert J.F., Liao Xiao-Zhou et al. Simultaneously increasing the ductility and strength of ultrafine-grained pure copper. *Advanced Materials*, 2006, vol. 18, no. 22, pp. 2949–2953. DOI: [10.1002/adma.200601472](https://doi.org/10.1002/adma.200601472).
 12. Sanders P.G., Eastman J.A., Weertman J.R. Elastic and tensile behavior of nanocrystalline copper and palladium. *Acta Materialia*, 1997, vol. 45, no. 10, pp. 4019–4025. DOI: [10.1016/S1359-6454\(97\)00092-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(97)00092-X).
 13. Fu H.H., Benson D.J., Meyers M.A. Analytical and computational description of effect of grain size on yield stress of metals. *Acta Materialia*, 2001, vol. 49, no. 13, pp. 2567–2582. DOI: [10.1016/S1359-6454\(01\)00062-3](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00062-3).
 14. Lu Lei, Shen Yongfeng, Chen Xianhua, Qian Lihua, Lu K. Ultrahigh strength and high electrical conductivity in copper. *Science*, 2004, vol. 304, no. 5669, pp. 422–426. DOI: [10.1126/science.1092905](https://doi.org/10.1126/science.1092905).
 15. Islamgaliev R.K., Nesterov K.M., Bourgon J., Champion Y., Valiev R.Z. Nanostructured Cu-Cr alloy with high strength and electrical conductivity. *Journal of*

REFERENCES

1. Murashkin M.Y., Sabirov I., Sauvage X., Valiev R.Z. Nanostructured Al and Cu alloys with superior strength and electrical conductivity. *Journal of Materials Science*, 2016, vol. 51, pp. 33–49. DOI: [10.1007/s10853-015-9354-9](https://doi.org/10.1007/s10853-015-9354-9).
2. Fu Qianqian, Li Bing, Gao Minqiang, Fu Ying, Yu Rongzhou, Wang Changfeng, Guan Renguo. Quantitative mechanisms behind the high strength and electrical conductivity of Cu-Te alloy manufactured by continuous extrusion. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, vol. 121, pp. 9–18. DOI: [10.1016/j.jmst.2021.12.046](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.12.046).

- Applied Physics*, 2014, vol. 115, no. 19, article number 194301. DOI: [10.1063/1.4874655](https://doi.org/10.1063/1.4874655).
16. Dalla Torre F., Lapovok R., Sandlin J., Thomson P.F., Davies C.H.J., Pereloma E.V. Microstructures and properties of copper processed by equal channel extrusion for 1-16 passes. *Acta Materialia*, 2004, vol. 52, no. 16, pp. 4819–4832. DOI: [10.1016/j.actamat.2004.06.040](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.06.040).
 17. Sarada B.V., Pavithra Ch.L.P., Ramakrishna M., Rao T.N., Sundararajan G. Highly (111) textured copper foils with high hardness and high electrical conductivity by pulse reverse electrodeposition. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2010, vol. 13, no. 6, pp. D40–D42. DOI: [10.1149/1.3358145](https://doi.org/10.1149/1.3358145).
 18. Takata N., Lee Seong-Hee, Tsuji N. Ultrafine grained copper alloy sheets having both high strength and high electric conductivity. *Materials Letters*, 2009, vol. 63, no. 21, pp. 1757–1760. DOI: [10.1016/j.matlet.2009.05.021](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2009.05.021).
 19. Hanazaki K., Shigeiri N., Tsuji N. Change in microstructures and mechanical properties during deep wire drawing of copper. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, vol. 527, no. 21–22, pp. 5699–5707. DOI: [10.1016/j.msea.2010.05.057](https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.05.057).
 20. Skrotzki W., Tränkner C., Chulist R., Beausir B., Suwas S., Tóth L.S. Texture heterogeneity in ECAP deformed copper. *Solid State Phenomena*, 2010, vol. 160, pp. 47–54. DOI: [10.4028/www.scientific.net/SSP.160.47](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.160.47).
 21. Guo Tingbiao, Wei Shiru, Wang Chen, Li Qi, Jia Zhi. Texture evolution and strengthening mechanism of single crystal copper during ECAP. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 759, pp. 97–104. DOI: [10.1016/j.msea.2019.05.042](https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.05.042).

Influence of crystallographic texture on the strength and electrical conductivity of ultrafine-grained copper

Danila V. Tarov*, student of Chair of Materials Science and Physics of Metals
Konstantin M. Nesterov, PhD (Physics and Mathematics),
 assistant professor of Chair of Materials Science and Physics of Metals
Rinat K. Islamgaliev, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics),
 professor of Chair of Materials Science and Physics of Metals
Elena A. Korznikova¹, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics),
 professor of Chair of Materials Science and Physics of Metals

Ufa University of Science and Technology, Ufa (Russia)

*E-mail: tarovdv@gmail.com

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5975-4849>

Received 05.07.2023

Revised 09.11.2023

Accepted 04.02.2025

Abstract: The paper covers the study of the influence of equal-channel angular pressing (ECAP) on the structure, crystallographic texture, mechanical properties and electrical conductivity of Cu-ETP copper (Russian analogue – M1), as well as the dependence of these characteristics on the orientation of the measurement direction relative to the cross-section (from -45° to 90°). The specific electrical conductivity and strength characteristics of the material in the as-delivered condition (hot-rolled) and the effect of annealing at a temperature of 450°C of the original sample are investigated. Mechanical tests for uniaxial tension, a study of microhardness using the Vickers method and a study of specific electrical conductivity based on measuring the parameters of the vortex field excited in the surface layers of the body are carried out. It is found that ECAP processing leads to a significant increase in the ultimate tensile strength to 425 MPa compared to the initial state of 300 MPa. The maximum tensile strength of 425 MPa is achieved at orientation angles relative to the ECAP cross-section of -45° . A significant increase in microhardness to 1364–1405 MPa, tensile strength to 350–425 MPa and electrical conductivity to 101.4–102.4 % IACS is a consequence of the selected directions of cutting the samples relative to the ECAP axis. This indicates the dependence of both mechanical and electrical properties of ultrafine-grained samples on the crystallographic texture orientation. A Cu-ETP copper sample subjected to ECAP with a cutting angle deviating from the ECAP cross-section of the sample by 7.5° has the most optimal crystallographic orientation. In this case, the values of microhardness and electrical conductivity reached 1405 MPa and 102.4 % IACS, respectively.

Keywords: crystallographic texture; strength; electrical conductivity; ultrafine-grained copper; equal-channel angular pressing; structure.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the State Assignment “Research of physical, chemical and mechanical processes in the formation and hardening of parts for aerospace and transport equipment” No. FEUE-2023-0006.

The paper was written on the reports of the participants of the XI International School of Physical Materials Science (SPM-2023), Togliatti, September 11–15, 2023.

For citation: Tarov D.V., Nesterov K.M., Islamgaliev R.K., Korznikova E.A. Influence of crystallographic texture on the strength and electrical conductivity of ultrafine-grained copper. *Frontier Materials & Technologies*, 2025, no. 1, pp. 81–91. DOI: [10.18323/2782-4039-2025-1-71-7](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2025-1-71-7).