

Интенсификация процесса равноканального углового прессования с помощью ультразвуковых колебаний

Рубаник Василий Васильевич^{1,3}, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией физики металлов, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси

Ломач Марина Сергеевна^{*1,4}, младший научный сотрудник

Рубаник Василий Васильевич мл.^{1,5}, доктор технических наук, профессор, директор

*Луцко Валерий Федорович*¹, старший научный сотрудник

*Гусакова Софья Викторовна*², кандидат физико-математических наук,

ведущий инженер радиационной и вакуумной аппаратуры сектора обслуживания научных исследований

¹Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси, Витебск (Республика Беларусь)

²Белорусский государственный университет, Минск (Республика Беларусь)

*E-mail: ita@vitebsk.by

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0350-1180>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9930-1798>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9268-0167>

Поступила в редакцию 30.06.2023

Пересмотрена 09.10.2024

Принята к публикации 28.10.2024

Аннотация: Представлен новый способ равноканального углового прессования (РКУП) с использованием мощных ультразвуковых колебаний (УЗК). Разработано оригинальное устройство ультразвукового РКУП, в котором волновод с матрицей выполнены как единое целое, а элементы крепления волновода расположены в узловой плоскости механических смещений стоячей волны, возбуждение которой происходит непосредственно в матрице и заготовке в процессе прессования. Впервые предложено передавать УЗК в зону пересечения каналов матрицы, через которые перемещается заготовка, не через пуансон, а посредством возбуждения колебаний в самой матрице, т. е. матрица одновременно является волноводом продольных УЗК. Это позволило многократно повысить эффективность ультразвукового воздействия за счет снижения сил трения между поверхностью заготовки и поверхностью каналов матрицы, а также за счет снижения деформационных усилий в зоне пересечения каналов матрицы, где происходит простой сдвиг деформируемого металла. В результате по сравнению с известными способами ультразвукового РКУП, в которых снижение усилия прессования составляет менее 15 %, возбуждение УЗК непосредственно в волноводе-матрице позволило снизить усилие прессования в 1,5–4 раза. При этом существенно меняется и структура прессуемых материалов: уменьшается размер зерен и их кристаллографические ориентировки, увеличивается микротвердость. Изменения фазового состава для всех образцов, полученных РКУП с УЗК и по обычной технологии, не наблюдается.

Ключевые слова: равноканальное угловое прессование; РКУП; ультразвуковые колебания; УЗК; объемное наноструктурирование; интенсивная пластическая деформация; ИПД; волновод; матрица; деформационные усилия; зеренная структура; цинк; алюминий.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Т22КИТГ-011).

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

Для цитирования: Рубаник В.В., Ломач М.С., Рубаник В.В. мл., Луцко В.Ф., Гусакова С.В. Интенсификация процесса равноканального углового прессования с помощью ультразвуковых колебаний // *Frontier Materials & Technologies*. 2024. № 4. С. 73–85. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-4-70-7.

ВВЕДЕНИЕ

Получение объемных наноструктурированных металлических материалов является актуальным и востребованным направлением современного материаловедения. Такие металлы и сплавы привлекательны для инновационных применений, так как обладают уникальными свойствами. При этом особенности структуры таких материалов (доля мало- и большеугловых границ, размер зерен и др.) определяются методами их получения. Наиболее распространены и изучены два

метода интенсивной пластической деформации (ИПД): равноканальное угловое прессование (РКУП) и кручение под высоким давлением.

РКУП, как метод ИПД металлических материалов, с помощью которого стало возможно получать заготовки с мелкозернистой структурой за счет объемного наноструктурирования, было предложено В.М. Сегалом с сотрудниками в 70-х гг. XX в. [1] и с начала 90-х гг. стало применяться для ИПД с целью получения субмикронных и наноразмерных металлических структур [2].

Такие структуры обладают существенно лучшими механическими свойствами, оптимально сочетающими прочность и пластичность. В частности, метод применяется для получения субмикронных кристаллических структур таких металлов, как Pd, Fe, Ni, Co, сплавов на основе Al, Mg, Ti, Zn и др. Метод ИПД посредством РКУП заключается в продавливании образцов через пересекающиеся под определенным углом каналы матрицы постоянного поперечного сечения. В результате образцы подвергаются сдвиговой деформации в зоне пересечения каналов, что приводит к изменению их структуры и физико-механических свойств¹ [3]. Таким образом, при проведении РКУП возможно накапливать сколь угодно большую деформацию сдвига без изменения размеров заготовки. В процессе прохождения через каналы суммарные сдвиговые характеристики в металлическом образце могут быть изменены за счет его вращения между отдельными проходами, т. е. структурообразование в процессе деформации напрямую зависит от маршрута РКУП [4]. Повторными проходами заготовки через пересекающиеся каналы можно добиться накопления желаемой степени деформации и в результате – необходимых структурных изменений. При этом геометрическая форма образца, за исключением областей вблизи его концов, не изменяется. Ультрамелкозернистая (УМЗ) структура образцов с преимущественно большеугловыми разориентировками границ зерен, полученных методом РКУП, зависит от многих параметров: числа проходов, маршрута, температуры деформации, угла пересечения каналов, радиуса закругления в месте пересечения каналов, скорости прохода образца, материала образца, вида смазки [2; 5].

Одним из способов снижения деформационных усилий при обработке металлов давлением (ОМД) является использование ультразвуковых колебаний (УЗК), для чего разрабатываются различные устройства и схемы подвода УЗК к очагу деформации [6; 7]. При этом ультразвуковое воздействие в процессе ОМД приводит и к изменению структуры и физико-механических свойств материалов. В зависимости от частоты, амплитуды УЗК, локальности воздействия можно достичь как упрочнения металла, так и его разупрочнения, пластификации [6].

ОМД с наложением УЗК широко начали применять после открытия акустопластического эффекта [8]. Эффект заключался в резком снижении напряжения пластического течения металла при ультразвуковом воздействии. Степень снижения зависит от многих факторов, в первую очередь от мощности ультразвукового воздействия и технологических параметров процессов ОМД. В частности, колебательная скорость ультразвукового инструмента должна быть намного выше скорости деформации металла [6; 7]. С этой точки зрения РКУП является идеальным процессом для интенсификации его с помощью УЗК, так как скорости прессования небольшие (кроме РКУП взрывом), а силы трения велики, т. е. УЗК, снижая силы трения, должны влиять как на силовые условия протекания процесса РКУП, так и на свойства получаемых заготовок [6; 7]. Однако, несмотря на

очевидность эффективности ультразвукового воздействия на РКУП, УЗК в данном процессе до недавнего времени не применяли из-за сложности ввода их в очаг деформации. Авторы изучали уменьшение силы трения скольжения металлов с помощью продольных или поперечных УЗК² [9]. Результаты их исследования показали, что колебания в продольном или поперечном направлении можно использовать для значительного уменьшения сил трения скольжения между взаимодействующими поверхностями. В работах [10; 11] численно исследовался эффект от наложения УЗК на пуансон во время процесса РКУП. Расчеты показали, что должно происходить уменьшение силы деформирования, которое зависит от амплитуды колебаний и скорости перемещения пуансона.

Действительно, результаты экспериментальных исследований РКУП алюминиевых сплавов с ультразвуковым воздействием на деформируемый металл через пуансон подтвердили, что использование УЗК снижает усилие прессования на 10 % [11]. При этом значительное влияние на снижение усилия прессования оказывают амплитуда и частота УЗК [11–13]. Использование УЗК при РКУП приводит к увеличению предела текучести, предела прочности и твердости металлических материалов [12; 14]. Недостатком предложенного способа ультразвукового воздействия на РКУП является низкая эффективность [10; 12; 15]. Это связано с невозможностью ввода в очаг деформации значительной ультразвуковой энергии через пуансон, который является элементом акустической системы – волноводом продольных УЗК.

В Институте технической акустики Национальной академии наук Беларуси разработано оригинальное устройство ультразвукового РКУП, в котором волновод с матрицей выполнены как единое целое с общей длиной, равной

$$l = n \frac{\lambda}{2},$$

где λ – длина продольной ультразвуковой волны в материале матрицы-волновода;
 n – целое число.

Элементы крепления волновода располагают в узловой плоскости механических смещений стоячей волны, возбуждение которой происходит непосредственно в матрице и заготовке в процессе прессования [16].

Цель работы – интенсификация процесса равноканального углового прессования с помощью ультразвуковых колебаний, а также изучение их влияния на силовые характеристики РКУП металлических материалов и свойства получаемых образцов при возбуждении УЗК в матрице, т. е. непосредственно в зоне деформирования.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала выбран цинк чистотой 99,9 мас. % и алюминиевый сплав А7 стандартного химического состава (таблица 1).

¹ Shivashankara B.S., Gopi K.R., Pradeep S., Raghavendra Rao R. Investigation of mechanical properties of ECAP processed AL7068 aluminium alloy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1189. Article number 012027. DOI: [10.1088/1757-899X/1189/1/012027](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1189/1/012027).

² Gudimetla K., Kumar S.R., Ravisankar B., Prathipati R.P., Kumaran S. Consolidation of commercial pure aluminum particles by hot ECAP // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 330. Article number 012031. DOI: [10.1088/1757-899X/330/1/012031](https://doi.org/10.1088/1757-899X/330/1/012031).

Таблица 1. Химический состав материала А7 (ГОСТ 11069-2001), %
 Table 1. Chemical composition of the А7 material (GOST 11069-2001), %

Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Ga	Примеси
≤0,16	≤0,15	≤0,03	≤0,01	min 99,7	≤0,01	≤ 0,02	≤0,04	≤0,03	прочие, каждая 0,02

Исходные образцы из цинка и алюминиевого сплава А7 имели длину 20 мм и диаметр 5 мм. Источником УЗК служил ультразвуковой генератор мощностью 4,0 кВт с магнитоэлектрическим преобразователем ПМС-15А-18 (Россия). Амплитуда колебаний на торце волновода-матрицы – до 30 мкм, частота колебаний составляла ~18 кГц. Процесс РКУП осуществляли при температуре 20–22 °С с помощью гидравлического ручного пресса ПППР со скоростью перемещения пуансона 4÷10 мм/с.

Структуру образцов исследовали на оптическом микроскопе MICRO-200 (Республика Беларусь), а также с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) марки LEO1455VP (Германия). Полученные растровые электронно-микроскопические изображения были адаптированы к программной среде NEXSYS ImageExpert Pro 3. Зернистая структура исследовалась методом дифракции обратно отраженных электронов (ДОО), реализованным с помощью дифракционной приставки фазового анализа HKL EBSD Premium System Channel 5 (Великобритания) к СЭМ. Для определения ориентации зеренной структуры приготавливались продольные (в направлении деформации) шлифы образцов как в цинке, так и в алюминиевом сплаве.

При помощи микротвердомера ПМТ-3М (Россия) была определена микротвердость образцов цинка и алюминиевого сплава после обычного РКУП и РКУП с УЗК. Значение микротвердости определяли по методу Виккерса замером длин диагоналей отпечатка с учетом величины нагрузки, равной 0,196 Н. Для расчета значения микротвердости бралась средняя величина четырех замеров в каждой рассматриваемой области.

При прессовании образцов использовали графитовую смазку. Заготовки цинка и алюминиевого сплава А7 продавливали через матрицу, имеющую два канала равного сечения диаметром 5 мм, пересекающихся под углом 90° (рис. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Установлено, что наложение УЗК при РКУП цинка и алюминиевого сплава А7 приводит к снижению усилия прессования в 1,5 раза и более (рис. 2). Изменение скорости прессования в пределах 4÷10 мм/с практически не влияет на усилие прессования, а динамика ее изменения определяется величиной перемещения пуансона. После одного прохода РКУП с наложением УЗК (рис. 3 а) микроструктура цинка отличается от микроструктуры цинка,

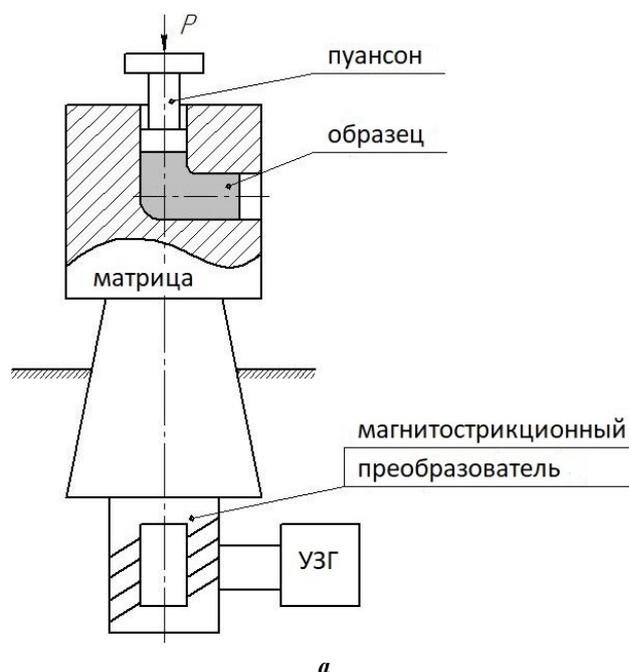


Рис. 1. Схема (а) и внешний вид (б) акустического узла устройства ультразвукового РКУП
 Fig. 1. Schematic (a) and external appearance (b) of the acoustic unit of the ultrasonic assisted ECAP device

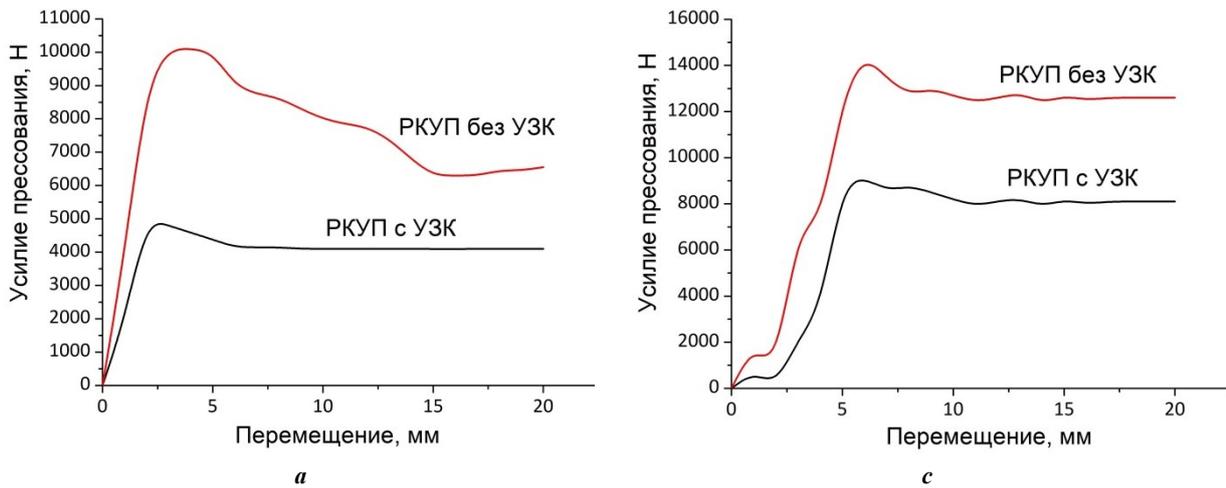


Рис. 2. Зависимость усилия прессования цинка от перемещения пуансона (а) и алюминиевого сплава А7 (б)
Fig. 2. Dependence of the pressing force of zinc on the displacement of the punch (a) and A7 aluminium alloy (b)

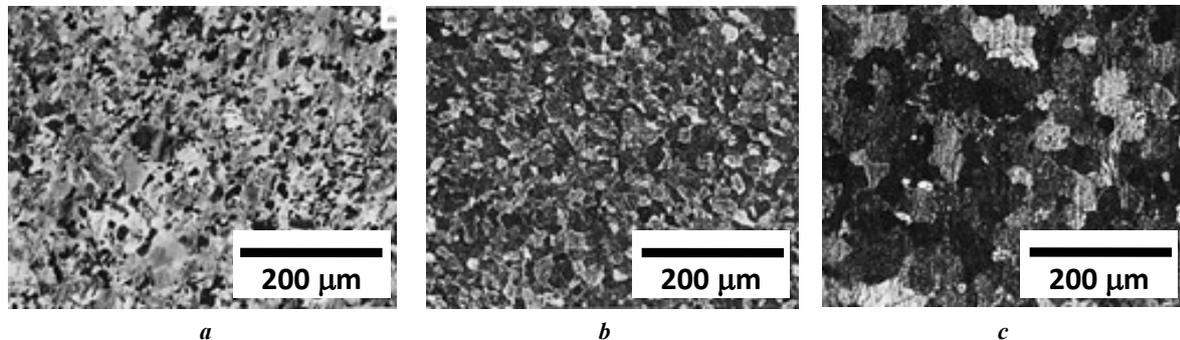


Рис. 3. Микроструктура цинка: а – исходного; б – после 1 прохода РКУП без УЗК; с – после 1 прохода РКУП с УЗК
Fig. 3. Microstructure of zinc: a – initial; b – after 1 pass of ECAP without UV; c – after 1 pass of ECAP with UV

полученного при обычном РКУП (рис. 3 б) и от микроструктуры исходного образца (рис. 3 с). Происходит измельчение зерен, и зерна приобретают более равноосную форму. Процесс измельчения зерен не зависит от изменения скорости прессования в исследуемом диапазоне скоростей.

Результаты исследования анализа зеренной структуры цинка приведены на рис. 4–7. В исходном сплаве средний размер зерен составляет 10,6 мкм. Однако, согласно данным распределения размеров зерен по размерным группам (рис. 6 а), существует большой разброс размеров зерен. Сравнение данных СЭМ-изображений микроструктуры и результатов ДОО позволяет утверждать, что высока объемная доля крупных зерен с размером, превышающим 20 мкм. При этом в крупных зернах наблюдается высокая плотность малоугловых границ зерен, как показано на гистограмме разориентации зерен (рис. 5 а).

После деформации в процессе РКУП средний размер зерен уменьшается до 3,6 мкм (рис. 6 б). Анализ зеренной структуры показывает, что мелкие зерна формируются на границах крупных зерен (рис. 4 б). Доля малоугловых границ в зерне снижается в 2 раза (рис. 5 б). Это позволяет предположить, что в процессе одного прохода РКУП деформация осуществляется за счет движения малоугловых границ к границе зерна.

Поскольку цинк обладает ярко выраженной анизотропией кристаллической решетки и, соответственно, механических свойств, то такой механизм может протекать для зерен, ориентация которых благоприятна.

В образцах, подвергнутых РКУП с наложением УЗК, выявлено уменьшение среднего размера зерна до 2,9 мкм (рис. 7). При этом наблюдается сужение распределения размера зерен по размерным группам и низкая концентрация малоугловых границ зерен, как показано на рис. 4 с и 5 с соответственно. Полученный результат позволяет утверждать, что в процессе деформации при воздействии ультразвука активируется движение дислокаций не только в благоприятно ориентированных зернах, но и во всем объеме образца. Из анализа гистограмм разориентации зерен видно, что в образце цинка, подвергнутом одному проходу РКУП без УЗК и с УЗК, преимущество имеет доля малоугловых границ (рис. 5).

Текстура цинка исследована методом ДОО после РКУП без УЗК (рис. 8 а) и РКУП с УЗК (рис. 8 б). На рис. 8 приведены прямые полюсные фигуры проекций плоскостей $\{0001\}$, $\{10-1-2\}$, $\{10-11\}$ на плоскость образца $OX-OY$. В центре круга (рис. 8) располагается проекция нормали к поверхности. Максимальная плотность проекций, расположенных вблизи от центра круга, в обоих случаях приходится на отражение от плоскости (0001) .

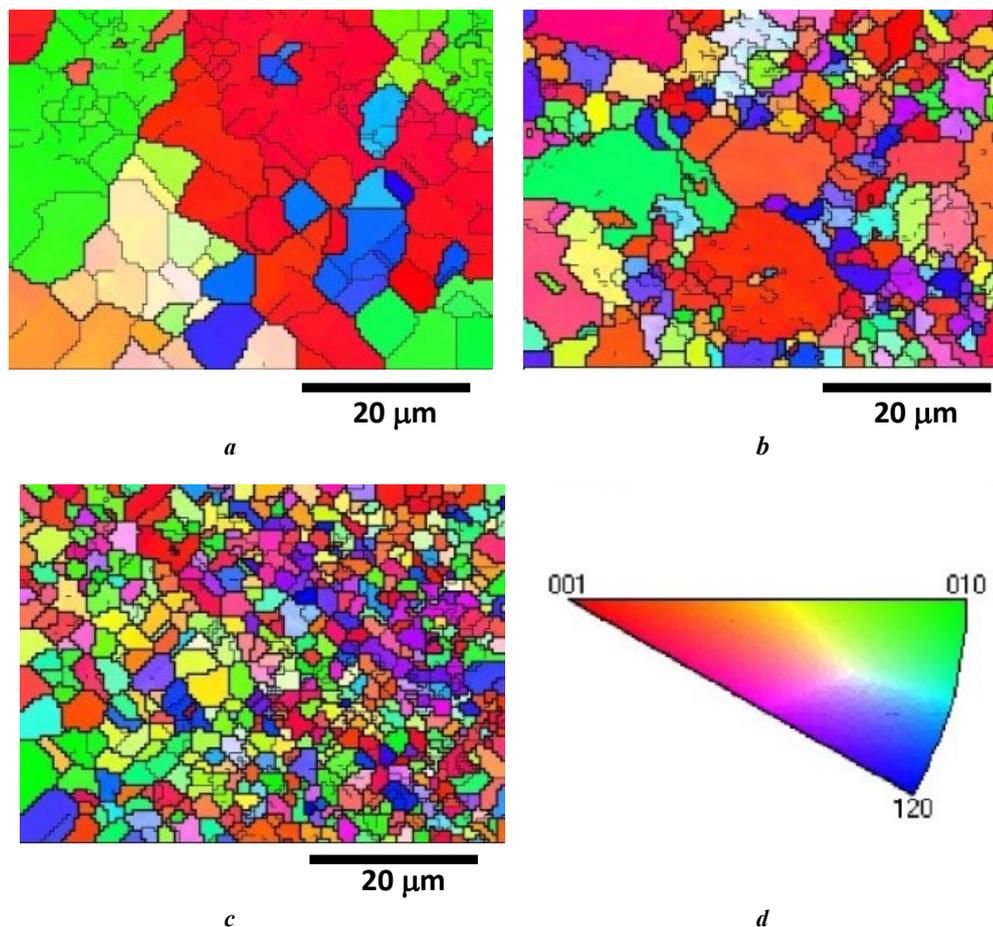


Рис. 4. Зеренная структура цинка: **a** – исходного; **b** – после 1 прохода РКУП без УЗК; **c** – после 1 прохода РКУП с УЗК; **d** – цветовой код.

Жирными черными линиями выделены границы зерен с разориентацией больше 10° , тонкими черными линиями – малоугловые границы с разориентацией больше 2° и меньше 10°

Fig. 4. Grain structure of zinc: **a** – initial; **b** – after 1 pass of ECAP without UV; **c** – after 1 pass of ECAP with UV; **d** – colour code.
Bold black lines highlight grain boundaries with a misorientation greater than 10° , thin black lines highlight low-angle boundaries with a misorientation greater than 2° and less than 10°

Среднее значение микротвердости для образцов цинка, полученных РКУП с УЗК, составляло $\sim 30,6$ HV, для образцов без УЗК – $\sim 26,9$ HV. При этом для всех образцов цинка наблюдается небольшое увеличение микротвердости от центра к краям в поперечном сечении.

Что касается алюминиевого сплава А7, то средний размер зерна в исходном образце составлял ~ 16 мкм (рис. 9 а, 10 а). Наложение УЗК в процессе РКУП привело к изменению как размеров, так и формы зерен (рис. 9 б, 9 с). Из анализа гистограмм распределения зерен по размерам следует, что в процессе РКУП происходит их дробление. Средний размер зерна в образце алюминиевого сплава А7 после одного прохода РКУП без УЗК составил 6,0 мкм (рис. 10 б), с УЗК – 3,5 мкм (рис. 11).

В образцах алюминиевого сплава А7, подвергнутых одному проходу РКУП без УЗК, установлено увеличение доли высокоугловых границ и снижение доли малоугловых границ в 2 раза. Наложение ультразвука приводит к тому, что доля малоугловых границ снижается в 4 раза по сравнению с исходным сплавом (рис. 12).

На рис. 13 приведены результаты исследования текстуры алюминиевых образцов. Установлено, что в исходном образце наблюдается ярко выраженная текстура (101). После одного прохода РКУП без ультразвука

доля зерен ориентированных плоскостью (101) уменьшается в 24 раза. После воздействия ультразвука преимущественная ориентация зерен исчезает.

Среднее значение микротвердости для образцов А7, полученных РКУП с УЗК, составляло $\sim 23,4$ HV, для образцов без УЗК – $\sim 19,1$ HV. Наблюдается также небольшое увеличение микротвердости от центра к краям в поперечном сечении.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в работе результаты показали, что применение УЗК в процессе РКУП снижает силы трения между образцом и матрицей, а значит, и усилие прессования металлических материалов, изменяет структуру и физико-механические свойства деформируемого металла.

Ранее похожий результат был получен для промышленного алюминия AA-1050³. Однако в устройстве, описанном в [12; 15; 17], неэффективно использовалась

³ Donič T., Martikán M., Hadzima B. New unique ECAP system with ultrasound and backpressure // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2014. Vol. 63. Article number 012047. DOI: [10.1088/1757-899X/63/1/012047](https://doi.org/10.1088/1757-899X/63/1/012047).

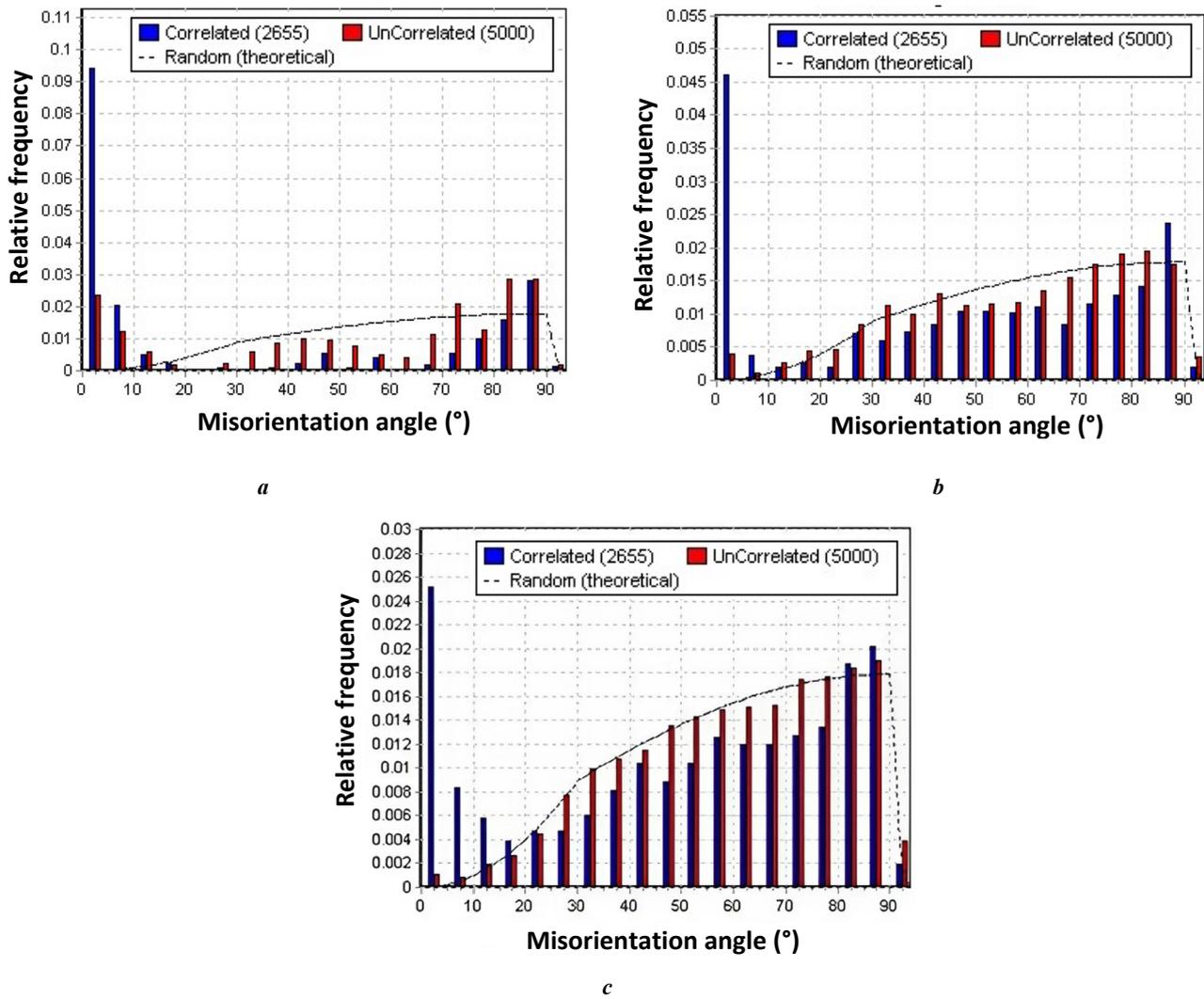


Рис. 5. Гистограммы разориентации зерен цинка:
a – исходного; *b* – после 1 прохода РКУП без УЗК; *c* – после 1 прохода РКУП с УЗК
Fig. 5. Histograms of grain misorientation of zinc:
a – initial; *b* – after 1 pass of ECAP without UV; *c* – after 1 pass of ECAP with UV

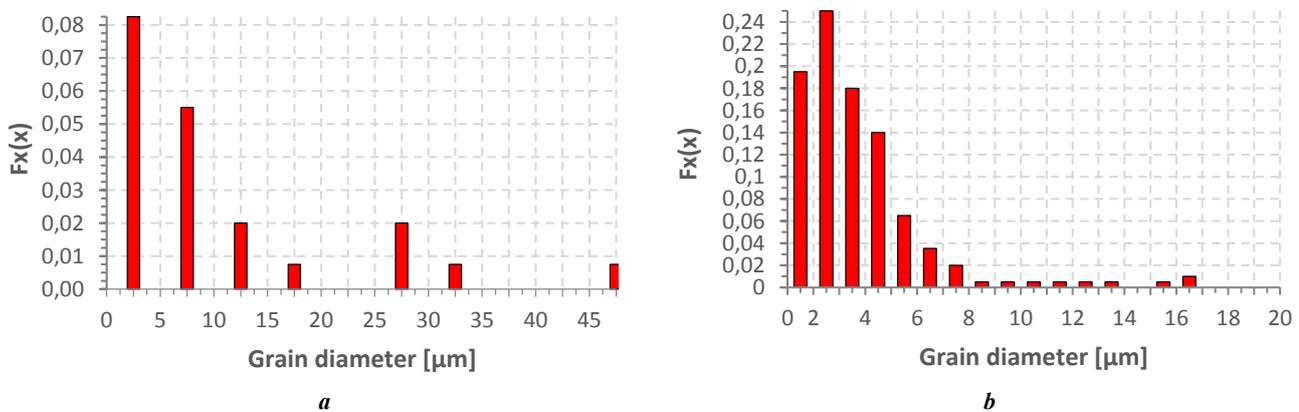


Рис. 6. Гистограммы размеров зерен цинка :
a – исходного; *b* – после 1 прохода РКУП без УЗК
Fig. 6. Histograms of grain sizes of zinc:
a – initial; *b* – after 1 pass of ECAP without UV

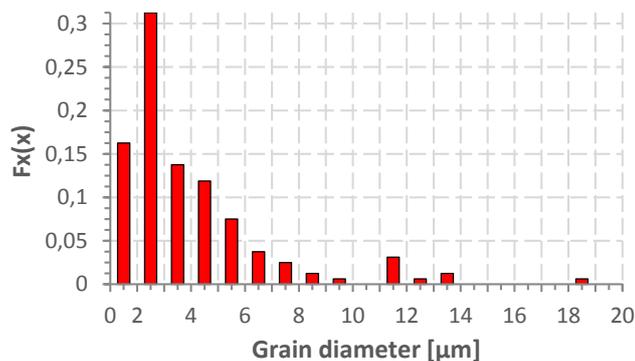


Рис. 7. Гистограммы размеров зерен цинка после 1 прохода РКУП с УЗК
Fig. 7. Histograms of grain sizes of zinc after 1 pass of ECAP with UV

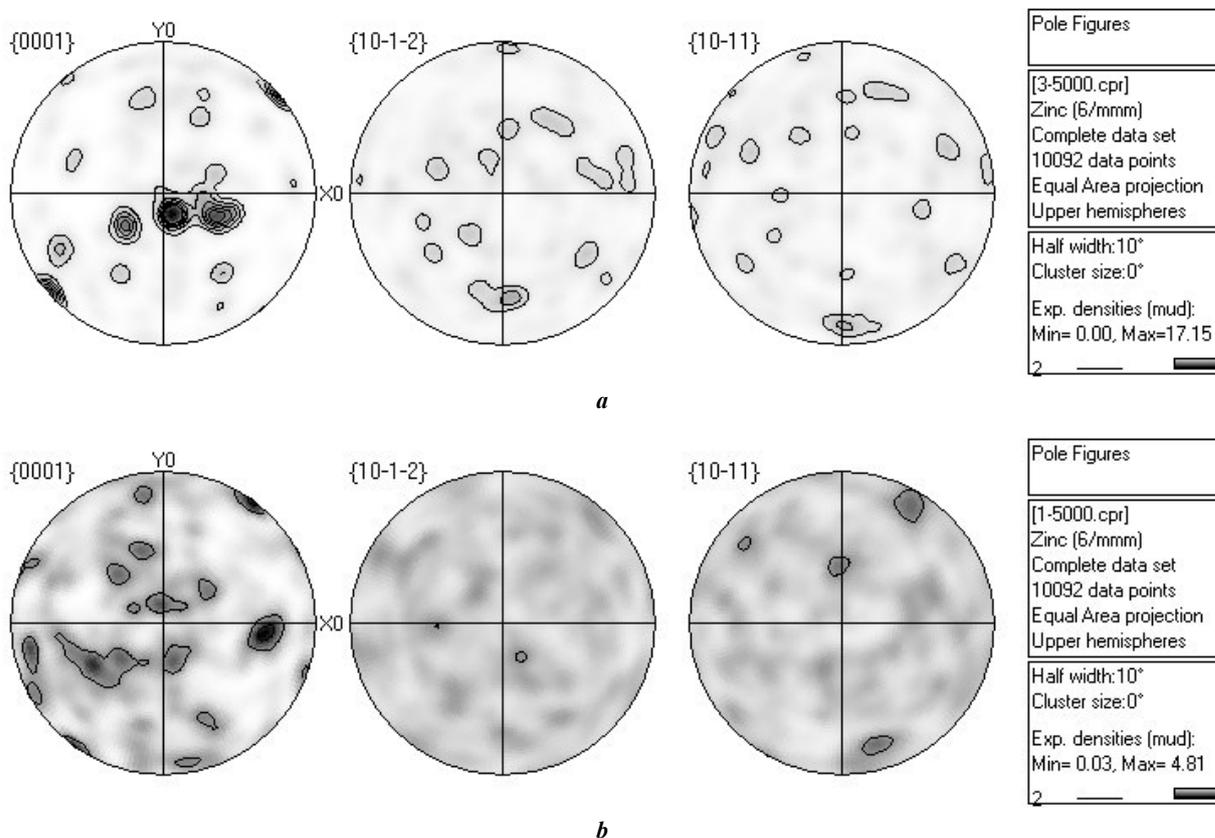


Рис. 8. Прямые полюсные фигуры цинка:
a – после 1 прохода РКУП без УЗК; **b** – после 1 прохода РКУП с УЗК
Fig. 8. Direct pole figures of zinc: **a** – after 1 pass of ECAP without UV; **b** – after 1 pass of ECAP with UV

энергия УЗК. При контакте источника УЗК, в качестве которого выбран магнитострикционный преобразователь с амплитудой колебаний 12 мкм и частотой 20 кГц, с подвижной частью узла деформации (пуансоном) изменяются масса и геометрический размер колебательной системы устройства. В результате этого колебательная система выходит из резонанса, амплитуда колебаний пуансона резко уменьшается. В итоге достигнутое снижение усилия деформации составило менее 15 %.

Результаты исследований, описанных в работе [11], также подтвердили, что использование УЗК снижает усилие прессования, но всего лишь на 10 %: 162,5 и 147,7 кН для обычного РКУП и РКУП с использованием УЗК соответственно. Основная причина этого снижения связана с уменьшением силы контактного трения между образцом и матрицей.

В наших исследованиях воздействие УЗК на образец осуществлялось не через подвижную часть узла деформации (пуансон), а через матрицу [16], т. е. возбуждение

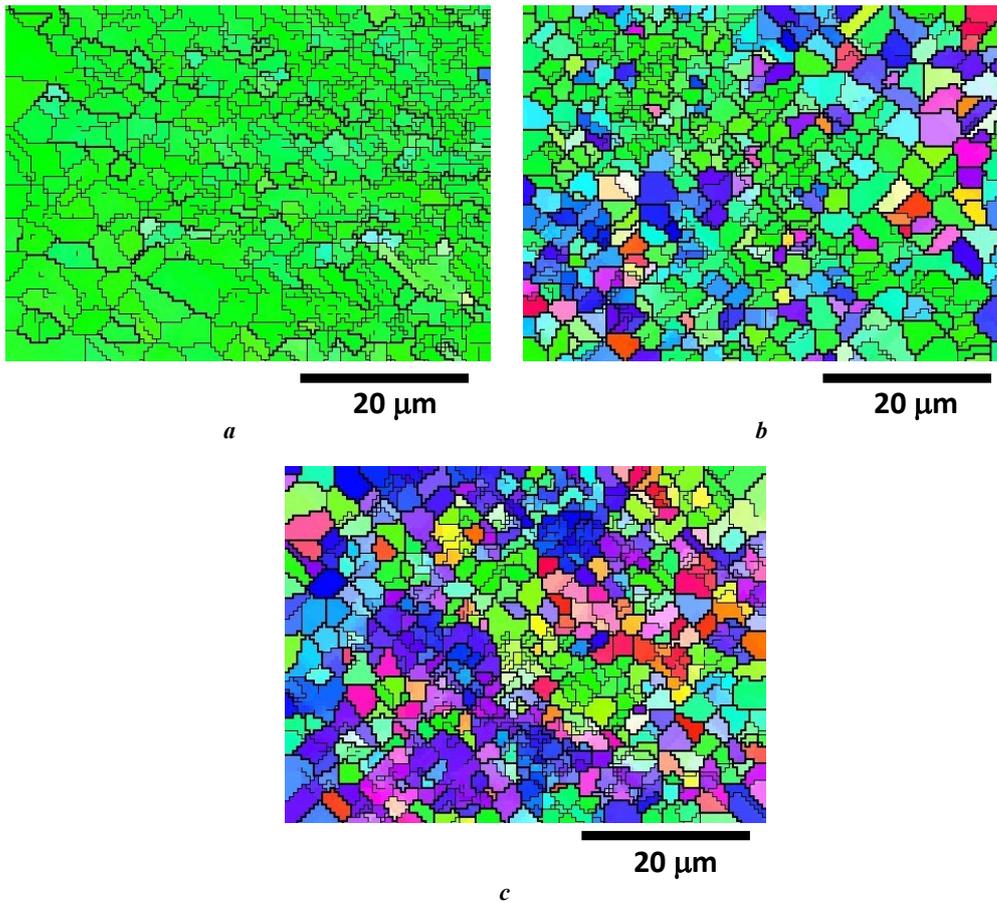


Рис. 9. Зеренная структура алюминиевого сплава А7: **a** – исходного; **b** – после 1 прохода РКУП без УЗК; **c** – после 1 прохода РКУП с УЗК
Fig. 9. Grain structure of the A7 aluminium alloy: **a** – initial; **b** – after 1 pass of ECAP without UV; **c** – after 1 pass of ECAP with UV

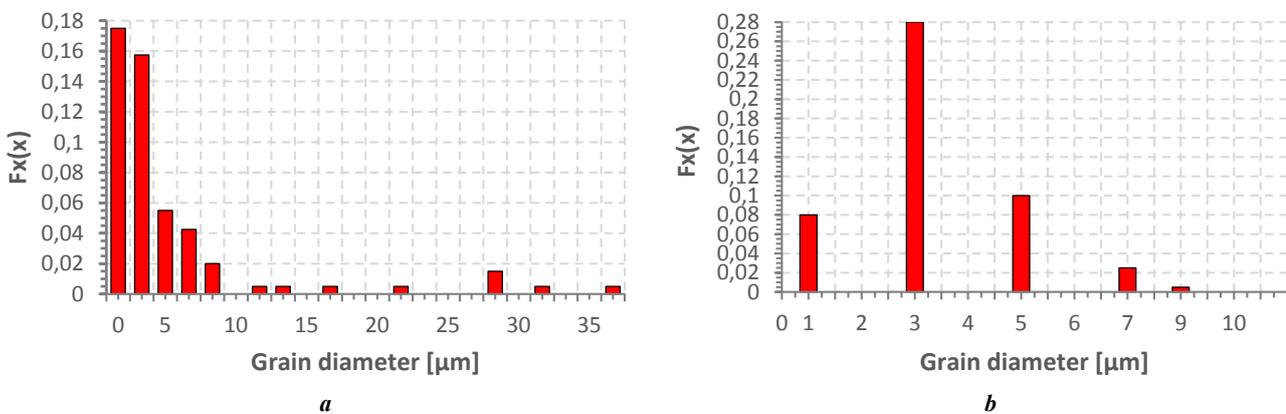


Рис. 10. Гистограммы размеров зерен алюминиевого сплава А7: **a** – исходного; **b** – после 1 прохода РКУП без УЗК
Fig. 10. Histograms of grain sizes of the A7 aluminium alloy: **a** – initial; **b** – after 1 pass of ECAP without UV

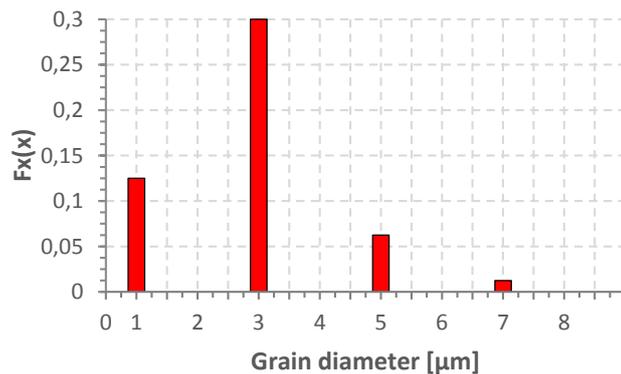


Рис. 11. Гистограммы размеров зерен алюминиевого сплава А7 после 1 прохода РКУП с УЗК
 Fig. 11. Histograms of grain sizes of the A7 aluminium alloy after 1 pass of ECAP with UV

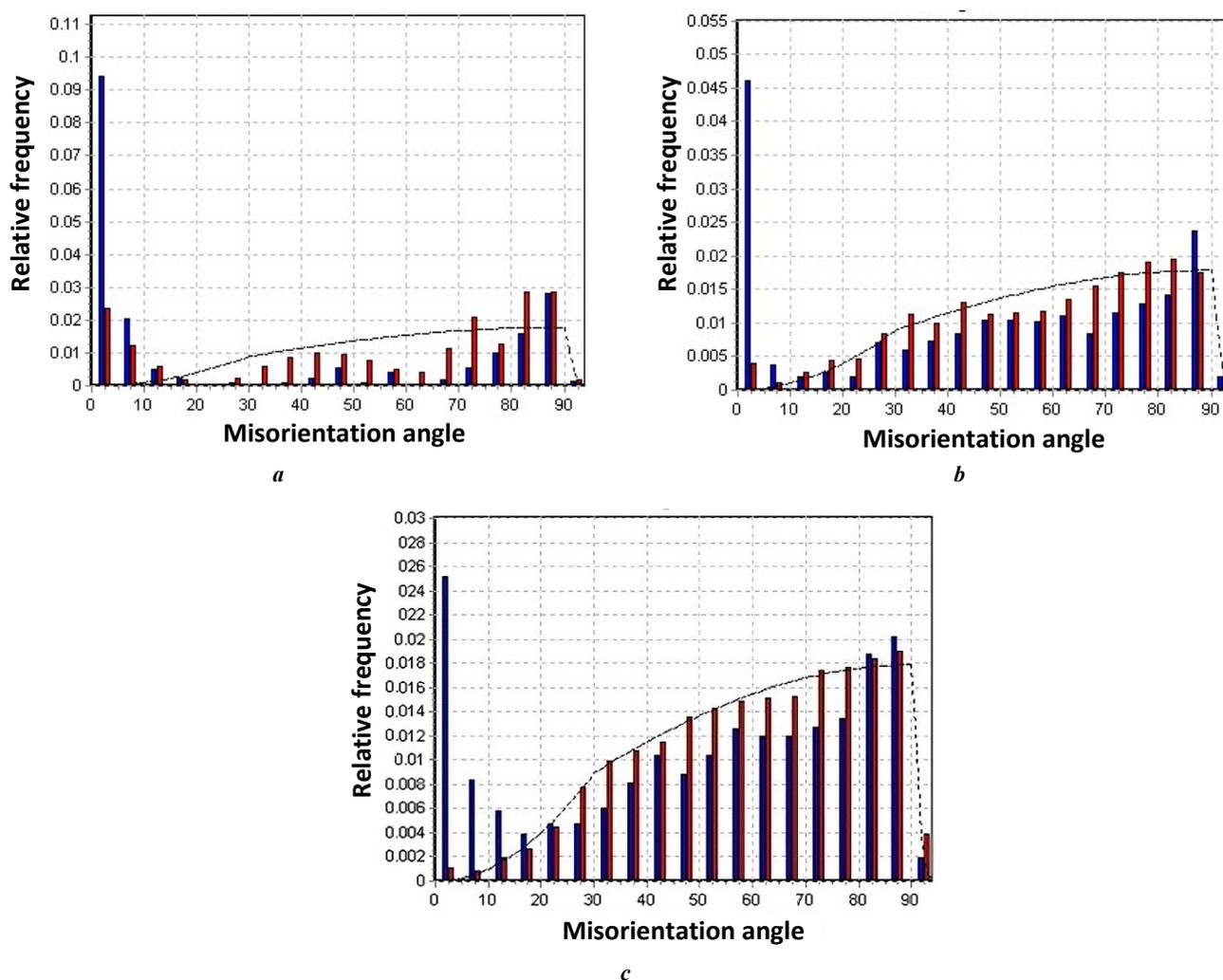


Рис. 12. Гистограммы разориентации зерен алюминиевого сплава А7:
 а – исходного; б – после 1 прохода РКУП без УЗК; в – после 1 прохода РКУП с УЗК
 Fig. 12. Histograms of grain misorientation of the A7 aluminium alloy:
 a – initial; b – after 1 pass of ECAP without UV; c – after 1 pass of ECAP with UV

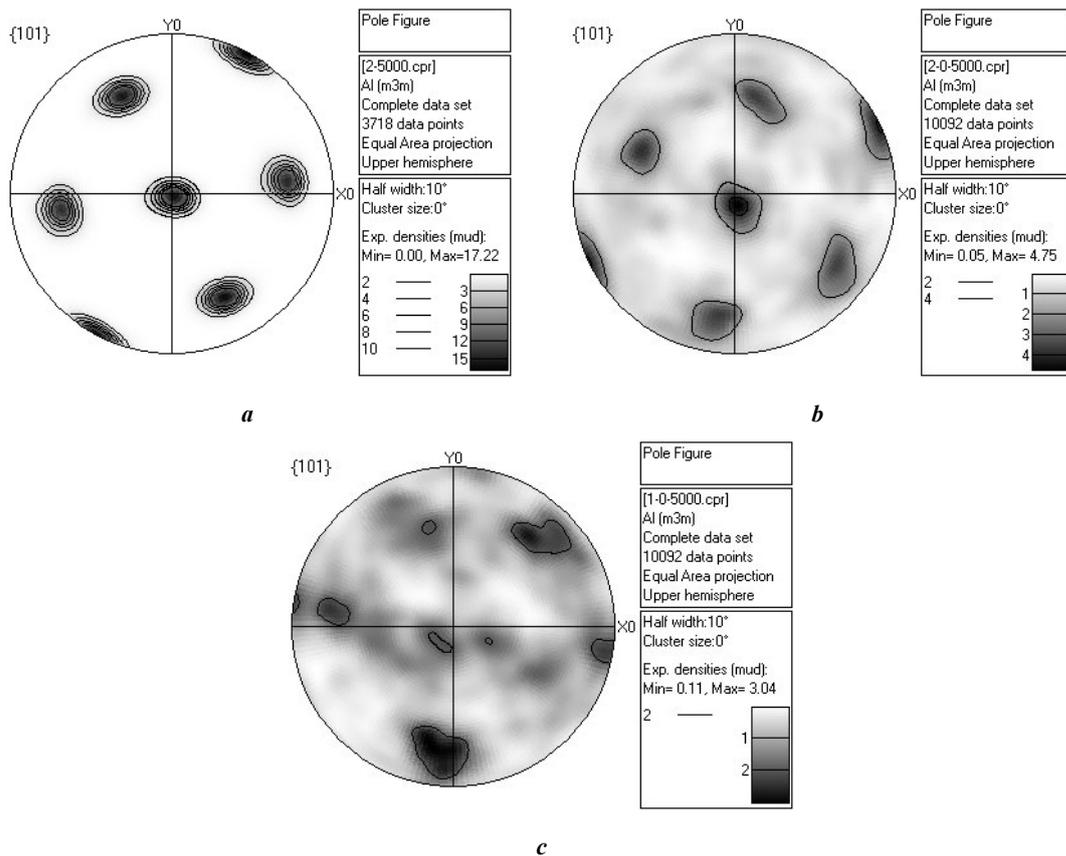


Рис. 13. Прямые полюсные фигуры алюминиевого сплава А7:
a – исходного; *b* – после 1 прохода РКУП без УЗК; *c* – после 1 прохода РКУП с УЗК
Fig. 13. Direct pole figures of the A7 aluminium alloy:
a – initial; *b* – after 1 pass of ECAP without UV; *c* – after 1 pass of ECAP with UV

стоячей ультразвуковой волны происходило непосредственно в матрице и заготовке в процессе РКУП. Использование волновода с матрицей, выполненных как единое целое (волновод-матрица), обеспечило исключение переходной области между ними как таковой. Энергия УЗК при этом подается непосредственно в зону обработки без потерь на границе раздела «волновод – матрица». Отсутствие этой границы обеспечивает также существенное повышение ресурса работы устройства в целом. Одновременно существенно снижается усилие деформации как за счет снижения сил трения между поверхностью пуансона и каналами волновода-матрицы, так и за счет снижения усилий деформационного сдвига металла в зоне пересечения каналов. Степень измельчения структуры заготовки возрастает, происходит облегчение стоков дислокаций заготовки. Что касается разориентации зерен как цинка, так и алюминиевого сплава А7, то преимущество имеет доля малоугловых границ (рис. 5 и 12). Это связано с ростом степени деформации. За один проход РКУП с УЗК и без УЗК сложно добиться однородной равноосной структуры с большим содержанием большеугловых границ зерен. В дальнейшем необходимо проведение РКУП с большим числом проходов как с наложением УЗК, так и без него.

Работа, направленная на совершенствование технологии РКУП как одного из методов ИПД, является актуальной. Использование УЗК при РКУП принципи-

ально изменяет свойства металлов и сплавов при формировании в них УМЗ структур, что позволит в большей мере реализовать сочетание высокой прочности и пластичности. Исследования необычного сочетания прочности и пластичности наноструктурных материалов имеют весьма важное как фундаментальное, так и практическое значение. С фундаментальной точки зрения эти исследования интересны для выяснения новых механизмов деформации. С практической стороны создание наноматериалов с высокой прочностью и пластичностью может резко повысить их усталостную прочность, ударную вязкость, снизить температуру хрупко-вязкого перехода, что позволит повысить срок службы и, следовательно, область применения многих перспективных материалов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Разработано оригинальное устройство РКУП, в котором волновод с матрицей выполнены как единое целое.

Впервые применен метод РКУП металлических материалов, таких как цинк и алюминиевый сплав А7, с подведением продольных УЗК непосредственно в зону деформирования за счет возбуждения их в матрице-волноводе.

Установлено, что наложение УЗК при РКУП цинка и алюминиевого сплава А7 приводит к снижению усилия

прессования в 1,5 раза и более за счет возбуждения колебаний в самой матрице, которая служила волноводом продольных УЗК.

Изменение скорости прессования в пределах 4–10 мм/с практически не влияет на усилие прессования.

Воздействие УЗК на процесс РКУП также является эффективным способом изменения структуры металлических материалов. Так, после одного прохода микроструктура материала, полученная прессованием с наложением УЗК, существенно отличается от микроструктуры образцов, полученных без УЗК: наблюдается уменьшение размера зерен и изменение их кристаллографической ориентировки, повышение механических свойств деформируемого металла, увеличение микротвердости.

Таким образом, можно утверждать, что ультразвуковое воздействие в процессе РКУП позволяет существенно изменить силовые характеристики процесса и свойства металлических материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. Процессы пластического структурообразования металлов. Минск: Наука и техника, 1994. 231 с.
2. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные материалы: получение, структура и свойства. М.: Академкнига, 2007. 397 с.
3. Khelfa T., Lachhab R., Azzeddine H., Chen Z., Muñoz J.A., Cabrera-Marrero J.M., Brisset F., Helbert A.-L., Baudin T., Khitouni M. Effect of ECAP and subsequent annealing on microstructure, texture, and microhardness of an AA6060 aluminum alloy // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022. Vol. 31. № 4. P. 2606–2623. DOI: [10.1007/s11665-021-06404-w](https://doi.org/10.1007/s11665-021-06404-w).
4. Пуспасари В., Астава И.Н.Г.П., Хербирово С., Мабрури Э. Механические свойства и микроструктура сплава Al–Mg (5052), обработанного методом равноканального углового прессования (РКУП) с вариациями методов РКУП и термической обработки // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2024. Т. 67. № 1. С. 37–46. DOI: [10.17073/0368-0797-2024-1-37-46](https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-1-37-46).
5. Agarwal K.M., Tyagi R.K., Choubey V., Saxena K.K. Mechanical behaviour of Aluminium Alloy AA6063 processed through ECAP with optimum die design parameters // *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2022. Vol. 2. P. 1901–1915. DOI: [10.1080/2374068X.2021.1878705](https://doi.org/10.1080/2374068X.2021.1878705).
6. Северденко В.П., Клубович В.В., Степаненко А.В. Ультразвук и пластичность. Минск: Наука и техника, 1976. 446 с.
7. Клубович В.В., Рубаник В.В., Царенко Ю.В. Ультразвук в технологии производства композиционных кабелей. Минск: Беларуская навука, 2012. 294 с.
8. Langenecker B. Effects of ultrasound on deformation characteristics of metals // *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*. 1966. Vol. 13. № 1. P. 1–8. DOI: [10.1109/T-SU.1966.29367](https://doi.org/10.1109/T-SU.1966.29367).
9. Kumar V.C., Hutchings I.M. Reduction of the sliding friction of metals by the application of longitudinal or transverse ultrasonic vibration // *Tribology International*. 2004. Vol. 37. № 10. P. 833–840. DOI: [10.1016/j.triboint.2004.05.003](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2004.05.003).
10. Ahmadi F., Farzin M. Finite element analysis of ultrasonic-assisted equal channel angular pressing // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2013. Vol. 16. P. 249–255. DOI: [10.1177/0954406213514961](https://doi.org/10.1177/0954406213514961).
11. Djavanroodi F., Ahmadian H., Naseri R., Koohkan K., Ebrahimi M. Experimental investigation of ultrasonic assisted equal channel angular pressing process // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 16. № 3. P. 249–255. DOI: [10.1016/j.acme.2015.10.001](https://doi.org/10.1016/j.acme.2015.10.001).
12. Shao Guangda, Li Hongwei, Zhan Mei. A review on ultrasonic-assisted forming: mechanism, model, and process // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 34. Article number 99. DOI: [10.1186/s10033-021-00612-0](https://doi.org/10.1186/s10033-021-00612-0).
13. Bagherzadeh S., Abrinia K., Han Qingyou. Analysis of plastic deformation behavior of ultrafine-grained aluminum processed by the newly developed ultrasonic vibration enhanced ECAP: Simulation and experiments // *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 50. P. 485–497. DOI: [10.1016/j.jmapro.2020.01.010](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.010).
14. Wu Bo, Lu Jianxun, Wu Zhaozhi, Wu Xiaoyu, Lou Yan, Ruan Shuangchen. Mechanical Properties and Microstructure of AZ31 Magnesium Alloy Processed by Intermittent Ultrasonic-Assisted Equal Channel Angular Pressing // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021. Vol. 30. № 1. P. 346–356. DOI: [10.1007/s11665-020-05389-2](https://doi.org/10.1007/s11665-020-05389-2).
15. Ahmadi F., Farzin M., Meratian M., Loeian S.M., Forouzan M.R. Improvement of ECAP process by imposing ultrasonic vibrations // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 79. P. 503–512. DOI: [10.1007/s00170-015-6848-1](https://doi.org/10.1007/s00170-015-6848-1).
16. Рубаник В.В., Рубаник В.В., Ломач М.С., Луцко В.Ф. Пресс для равноканального углового прессования: описание к полезной модели к патенту Республики Беларусь № BY 13457, 2024. 6 с.
17. Eskandarzade M., Masoumi A., Faraji G. Numerical and analytical investigation of an ultrasonic assisted ECAP process // *Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics*. 2016. Vol. 2. № 2. P. 167–184. DOI: [10.22064/TAVA.2016.22472](https://doi.org/10.22064/TAVA.2016.22472).

REFERENCES

1. Segal V.M., Reznikov V.I., Kopylov V.I. *Protsessy plasticheskogo strukturoobrazovaniya metallov* [Processes of plastic structure formation of metals]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1994. 231 p.
2. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. *Obemnye nanostrukturnye materialy: poluchenie, struktura i svoystva* [Bulk nanostructured materials: preparation, structure and properties]. Moscow, Akademkniga Publ., 2007. 397 p.
3. Khelfa T., Lachhab R., Azzeddine H., Chen Z., Muñoz J.A., Cabrera-Marrero J.M., Brisset F., Helbert A.-L., Baudin T., Khitouni M. Effect of ECAP and subsequent annealing on microstructure, texture, and microhardness of an AA6060 aluminum alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, vol. 31, no. 4, pp. 2606–2623. DOI: [10.1007/s11665-021-06404-w](https://doi.org/10.1007/s11665-021-06404-w).
4. Puspasari V., Astava I.N.G.P., Kherbirovo S., Mabruiri E. Mechanical properties and microstructure of Al–Mg (5052) alloy processed by equal-channel angular press-

- ing (ECAP) with variation of ECAP routes and heat treatment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 2024, vol. 67, no. 1, pp. 37–46. DOI: [10.17073/0368-0797-2024-1-37-46](https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-1-37-46).
5. Agarwal K.M., Tyagi R.K., Choubey V., Saxena K.K. Mechanical behaviour of Aluminium Alloy AA6063 processed through ECAP with optimum die design parameters. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2022, vol. 2, pp. 1901–1915. DOI: [10.1080/2374068X.2021.1878705](https://doi.org/10.1080/2374068X.2021.1878705).
 6. Severdenko V.P., Klubovich V.V., Stepanenko A.V. *Ul'trazvuk i plastichnost* [Ultrasound and plasticity]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1976. 446 p.
 7. Klubovich V.V., Rubanik V.V., Tsarenko Yu.V. *Ul'trazvuk v tekhnologii proizvodstva kompozitsionnykh kabeley* [Ultrasonic processing of materials]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2012. 294 p.
 8. Langenecker B. Effects of ultrasound on deformation characteristics of metals. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1966, vol. 13, no. 1, pp. 1–8. DOI: [10.1109/T-SU.1966.29367](https://doi.org/10.1109/T-SU.1966.29367).
 9. Kumar V.C., Hutchings I.M. Reduction of the sliding friction of metals by the application of longitudinal or transverse ultrasonic vibration. *Tribology International*, 2004, vol. 37, no. 10, pp. 833–840. DOI: [10.1016/j.triboint.2004.05.003](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2004.05.003).
 10. Ahmadi F., Farzin M. Finite element analysis of ultrasonic-assisted equal channel angular pressing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2013, vol. 16, pp. 249–255. DOI: [10.1177/0954406213514961](https://doi.org/10.1177/0954406213514961).
 11. Djavanroodi F., Ahmadian H., Naseri R., Koohkan K., Ebrahimi M. Experimental investigation of ultrasonic assisted equal channel angular pressing process. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 249–255. DOI: [10.1016/j.acme.2015.10.001](https://doi.org/10.1016/j.acme.2015.10.001).
 12. Shao Guangda, Li Hongwei, Zhan Mei. A review on ultrasonic-assisted forming: mechanism, model, and process. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, vol. 34, article number 99. DOI: [10.1186/s10033-021-00612-0](https://doi.org/10.1186/s10033-021-00612-0).
 13. Bagherzadeh S., Abrinia K., Han Qingyou. Analysis of plastic deformation behavior of ultrafine-grained aluminum processed by the newly developed ultrasonic vibration enhanced ECAP: Simulation and experiments. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 50, pp. 485–497. DOI: [10.1016/j.jmapro.2020.01.010](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.010).
 14. Wu Bo, Lu Jianxun, Wu Zhaozhi, Wu Xiaoyu, Lou Yan, Ruan Shuangchen. Mechanical Properties and Microstructure of AZ31 Magnesium Alloy Processed by Intermittent Ultrasonic-Assisted Equal Channel Angular Pressing. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, vol. 30, no. 1, pp. 346–356. DOI: [10.1007/s11665-020-05389-2](https://doi.org/10.1007/s11665-020-05389-2).
 15. Ahmadi F., Farzin M., Meratian M., Loeian S.M., Forouzan M.R. Improvement of ECAP process by imposing ultrasonic vibrations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 79, pp. 503–512. DOI: [10.1007/s00170-015-6848-1](https://doi.org/10.1007/s00170-015-6848-1).
 16. Rubanik V.V., Rubanik V.V., Lomach M.S., Lutsko V.F. *Press dlya ravnokanalnogo uglovogo pressovaniya* [Press for equal-channel angular pressing], opisaniye k poleznoy modeli k patentu Respubliki Belarus no. BY 13457, 2024, 6 p.
 17. Eskandarzade M., Masoumi A., Faraji G. Numerical and analytical investigation of an ultrasonic assisted ECAP process. *Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 167–184. DOI: [10.22064/TAVA.2016.22472](https://doi.org/10.22064/TAVA.2016.22472).

Intensification of the process of equal channel angular pressing using ultrasonic vibrations

Vasily V. Rubanik^{1,3}, Doctor of Sciences (Engineering), Professor,

Head of the Laboratory of Physics of Metals, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus

Marina S. Lomach^{*1,4}, junior researcher

Vasily V. Rubanik Jr.^{1,5}, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Director

Valery F. Lutsko¹, senior researcher

Sofya V. Gusakova², PhD (Physics and Mathematics),

leading engineer of radiation and vacuum equipment in the Scientific Research Service Sector

¹*Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus, Vitebsk (Republic of Belarus)*

²*Belarusian State University, Minsk (Republic of Belarus)*

*E-mail: ita@vitebsk.by

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0350-1180>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9930-1798>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9268-0167>

Received 30.06.2023

Revised 09.10.2024

Accepted 28.10.2024

Abstract: The work presents a new method of equal channel angular pressing (ECAP) using powerful ultrasonic vibrations (UV). The authors have developed an original device of ultrasonic ECAP, in which the waveguide with the matrix are made as a single unit, and the waveguide fastening elements are located in the nodal plane of mechanical displacements of the standing wave, the excitation of which occurs directly in the matrix and the blank during pressing. For the first time, it has been proposed to transmit ultrasonic vibrations to the zone of intersection of the matrix channels through which the blank moves, not through the punch, but by exciting vibrations in the matrix itself, i. e. the matrix is simultaneously a waveguide for longitudinal ultrasonic vibrations. This allowed increasing repeatedly the efficiency of

ultrasonic action by reducing the friction forces between the surface of the blank and the surface of the matrix channels, as well as by reducing the deformation forces in the zone of intersection of the matrix channels, where a simple shift of the deformed metal occurs. As a result, in comparison with the known methods of ultrasonic ECAP, when the reduction in pressing force is less than 15 %, the excitation of ultrasonic vibrations directly in the waveguide – matrix allowed reducing the pressing force by 1.5–4 times. At the same time, the structure of the pressed materials also changes significantly: the grain size and their crystallographic orientations decrease, the microhardness increases. Changes in the phase composition for all samples produced by ECAP with ultrasonic vibrations, and by conventional technology are not observed.

Keywords: equal channel angular pressing; ECAP; ultrasonic vibrations; UV; bulk nanostructuring; severe plastic deformation; SPD; waveguide; matrix; deformation forces; grain structure; zinc; aluminium.

Acknowledgments: The work was supported by the Belorussian Republican Foundation for Fundamental Research (Project No. T22KITG-011).

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: Rubanik V.V., Lomach M.S., Rubanik V.V. Jr., Lutsko V.F., Gusakova S.V. Intensification of the process of equal channel angular pressing using ultrasonic vibrations. *Frontier Materials & Technologies*, 2024, no. 4, pp. 73–85. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-4-70-7.