

УДК 621.9.011

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВА АМЦ

¹⁾ Рахадиллов Б.К., ¹⁾ Ботабаева Г.Б., ¹⁾ Жапарова М.С., ²⁾ Уазырханова Г.К., ²⁾ Баятанова Л.Б.

¹⁾ Восточно-Казахстанский государственный университет им. С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан

²⁾ Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

rakhadilovb@mail.ru

В данной работе рассмотрены особенности формирования ультрамелкозернистой структуры и закономерности повышения механических свойств алюминиевого сплава АМЦ, обработанного методом равноканального углового прессования (РКУП). Проведено систематическое исследование изменения структуры и механических характеристик (микротвердость и износостойкость) алюминиевого сплава АМЦ в зависимости от числа проходов и от угла между каналами прессования при РКУП. В работе показано, что за счет варьирования числа проходов можно получить разные размеры зерен и разные значения механических характеристик. Было установлено, что с уменьшением размеров зерен микротвердость сплава АМЦ увеличивается в 4,5 раза по сравнению с исходным состоянием. Показано, что после РКУП-12 потеря массы снижается, что показывает увеличение износостойкости сплава АМЦ на 13–14%. Выявлено, что после РКУП АМЦ прочностные характеристики повышаются, пластичность падает при переходе в ультрамелкозернистое состояние.

Ключевые слова: деформация, алюминиевый сплав, структура, прочность, пластичность.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных способов, обеспечивающих повышение свойств алюминиевых сплавов, является измельчение их зеренной структуры до ультрамелкозернистого (УМЗ) состояния такими перспективными методами интенсивной пластической деформации (ИПД) [1], как ИПД кручением (ИПДК), равноканальное угловое прессование (РКУП), а также его модификация – РКУП в параллельных каналах (РКУП-ПК).

На сегодняшний день среди методов ИПД наиболее эффективным является равноканальное угловое прессование (РКУП), которое позволяет обеспечить высокую интенсивность и более однородное деформированное состояние материалов. Метод РКУП имеет ряд преимуществ перед другими методами ИПД, которые связаны с реализацией, в процессе пластической деформации, схемы простого сдвига. [2]. Теоретически такая схема при минимальных энергозатратах позволяет накапливать большие и однородные деформации за один цикл обработки без изменения поперечного сечения заготовок. Однако, как показывает практика, использование этого метода при получении однородных структур требует исследований технических и технологических аспектов процесса, т.к. большое влияние на однородность деформированного состояния оказывает геометрия оснастки и трибология процесса.

В последнее десятилетие появилось большое количество публикаций, посвященных исследованию структуры и свойств нанокристаллических (НК) и ультрамелкозернистых (УМЗ) металлов и сплавов со средним размером зерен порядка нескольких десятков и сотен нанометров [3, 4]. Главным является тот факт, что УМЗ состояние материала приводит к уникальным

механическим и физическим свойствам и открывает путь к созданию новых материалов и модификации традиционных металлов и сплавов.

В связи с вышеизложенным, в данной работе представлены результаты исследования влияния метода равноканального углового прессования на структуру и свойства алюминиевого сплава АМЦ.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объекта исследования был выбран алюминиевый сплав АМЦ (96,35–99% Al, 1–1,5% Mn; 0,6% Si; 0,7% Fe; 0,05–0,2% Cu; 0,1% Zn), широко применяемый в современной авиации, самолетостроении, судостроении, железнодорожном транспорте, автомобильном транспорте, строительстве, нефтяной и химической промышленности.

Равноканальное угловое прессование (РКУП) в настоящее время является наиболее широко используемым методом ИПД. Метод заключается в продавливании (экструзии) материала через наклонные каналы с одинаковой площадью поперечного сечения (рисунок 1). Процедуру зачастую повторяют несколько раз [5].

Интенсивную пластическую деформацию осуществляли методом РКУП на пресс-оснастке (рисунок 1). Источником давления служил мощный гидравлический пресс KNWP 30M, дающий максимальное давление до 40 МПа (30 т). Прессование образцов производили давлением до 30 кг/см², при времени прессования до 40 с на каждый проход.

Углы пересечения каналов прессования составили соответственно 90° и 120°.

Для изучения общего характера структуры использовали оптический микроскоп «ALTAMI-MET-1M». Количественный металлографический анализ



Рисунок 1. Схема проведения РКУП прессования и пресс-оснастка с гидравлическим прессом для интенсивной пластической деформации

проводили согласно рекомендациям, приведенным в работе [6].

Измерение микротвердости образцов сталей проводили по методу Виккерса на приборе ПМТ-3М.

Испытания на износостойкость проводили на экспериментальной установке для испытаний на абразивное изнашивание при трении о не жестко закрепленные частицы абразива по схеме «вращающийся ролик – плоская поверхность» [7].

Испытания образцов на растяжение при комнатной температуре проводили на машине WDW-E5.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

РКУП приводит к существенному измельчению структуры алюминиевых сплавов в зависимости от количества проходов: 2, 4, 8, 12. Согласно результатам оптической микроскопии, для алюминиевого

сплава АМЦ в исходном состоянии характерны преимущественно равноосная форма зерен (рисунок 2). На рисунке 2 видно, что РКУП приводит к существенному измельчению структуры алюминиевых сплавов в зависимости от количества проходов РКУП.

Анализ микроструктуры после различных режимов РКУП и при разных углах пересечения каналов показал, что наиболее интенсивное измельчение зеренной структуры в алюминиевом сплаве АМЦ происходит при РКУП 12 проходов, при пересечении угла каналов на 120° . После РКУП-12 в алюминиевом сплаве происходит измельчение зерна исходного материала до размеров $\sim 1,0\text{--}1,5$ мкм. Эти результаты показывают, что средний размер зерен для сплава АМЦ уменьшился почти в 13 раз по сравнению с исходным состоянием. При РКУП -8 проходов, при пересечении угла каналов на 120° средний размер зерен в два раза больше, чем при РКУП-12 проходов.

На рисунке 3 представлена гистограмма микротвердости по Виккерсу для алюминиевого сплава АМЦ. После РКУП наблюдается увеличение микротвердости в зависимости от количества проходов. При этом у образцов, обработанных РКУП при угле пересечения каналов 90° микротвердость выше, чем в образцах, обработанных РКУП при угле пересечения каналов 120° . Однако, РКУП с углом пересечения каналов 90° не давал возможности получить заготовки с бездефектной структурой при проходах больше 4-х. А при РКУП с углом пересечения каналов 120° получили заготовки с однородной бездефектной структурой при количестве проходов до 12. В результате РКУП (12 прохода) микротвердость сплава АМЦ возрастает до величины 1820 МПа, что почти в 4,5 раза выше, чем в исходном состоянии.

Выявлено, что измельчение структуры при РКУП сопровождается ростом микротвердости в сплаве АМЦ.

На рисунке 4 показаны значения потери массы образцов сплава АМЦ до и после РКУП при разных режимах. Видно, что изменения потери массы после РКУП не значительны при проходах 2 и 4. Значительное изменение наблюдается только после РКУП проходом 8 и 12. При этом после РКУП-12 потеря массы снижается до 5,4–5,6 мг, что показывает увеличение износостойкости алюминиевого сплава АМЦ на 13–14%.

В таблице 1 показаны экспериментальные данные о структуре и свойствах алюминиевого сплава, полученных после РКУП при разных режимах. Результаты экспериментов наглядно иллюстрируют корреляцию между структурными и механическими характеристиками обработанных сплавов.

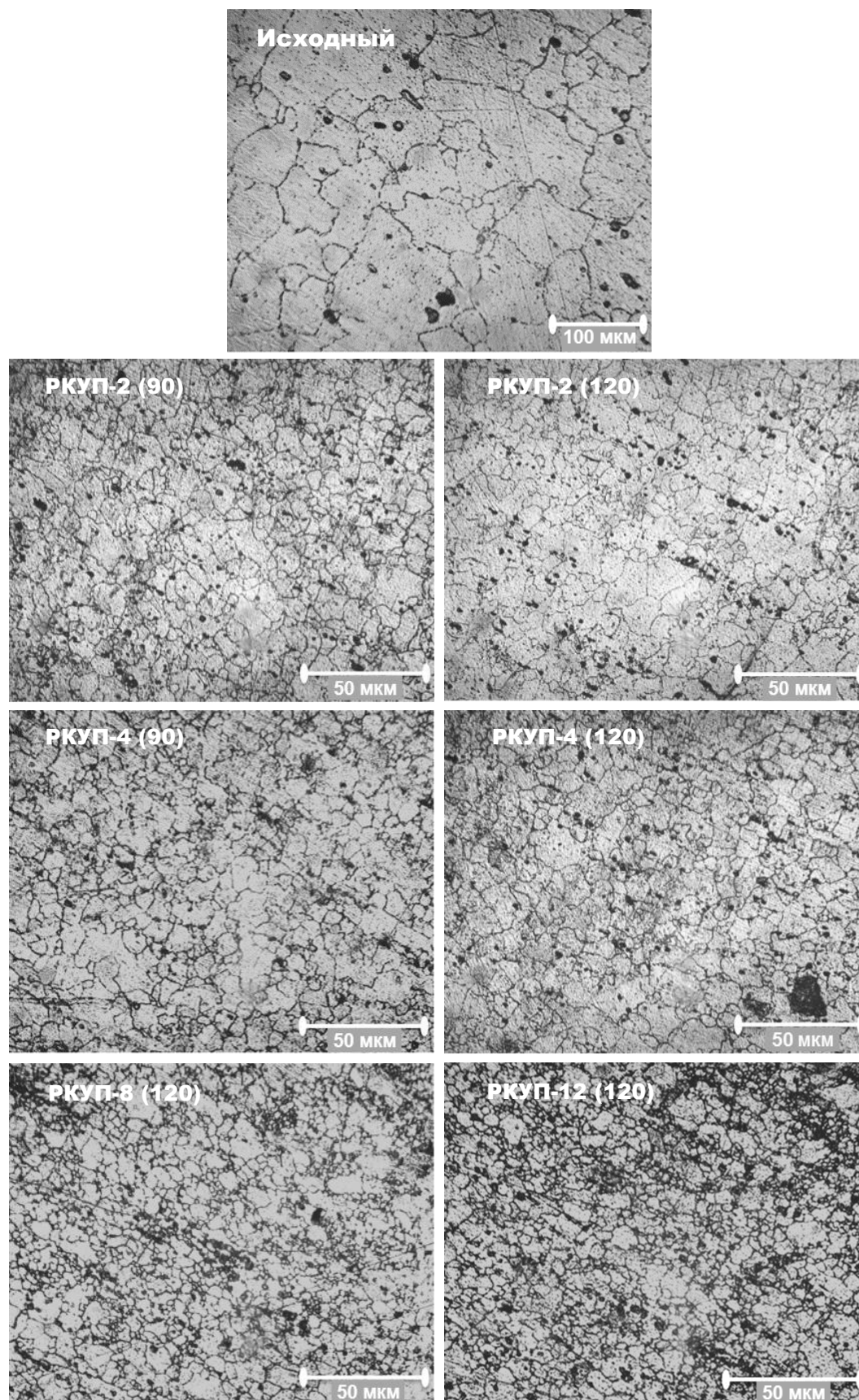


Рисунок 2. Микроструктура образцов сплава АМЦ до и после РКУП

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВА АМЦ

Таблица 1. Экспериментальные данные о структурных и механических характеристиках алюминиевого сплава АМЦ, обработанного методом РКУП

Ф	Режимы РКУП	Маршрут	Микротвердость, МПа	Износостойкость (потеря массы), мг	Средний размер зерен $d_{ср}$, мкм
	исходный	—	470	6,524	22,3
90	РКУП-2	С	660	6,487	8,89
90	РКУП-4	В	1290	6,456	4,17
120	РКУП-2	С	670	6,54	10,33
120	РКУП-4	В	1020	6,41	5,54
120	РКУП-8	В	1520	6,135	2,08
120	РКУП-12	В	1840	5,583	1,27

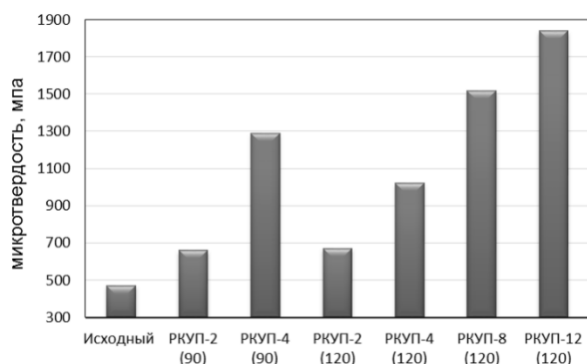


Рисунок 3. Микротвердость сплава АМЦ до и после РКУП

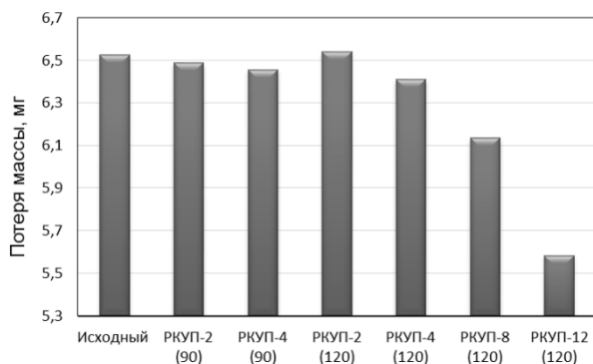


Рисунок 4. Износостойкость сплава АМЦ до и после РКУП

Свойства определяются характером формирующейся в процессе обработки структуры [8]. Проведено систематическое исследование изменения структуры и механических характеристик (микротвердость и износостойкость) алюминиевого сплава АМЦ в зависимости от числа проходов и от угла между каналами прессования при РКУП. В работе показано, что за счет варьирования числа проходов можно получить разные размеры зерен и разные значения механических характеристик.

Из обобщенных данных, приведенных в таблице 1, четко прослеживается зависимость микротвердости от среднего размера зерен. Также для сравнения полученных результатов представлен график зависи-

мости микротвердости от среднего размера зерен алюминиевого сплава АМЦ (рисунок 5).

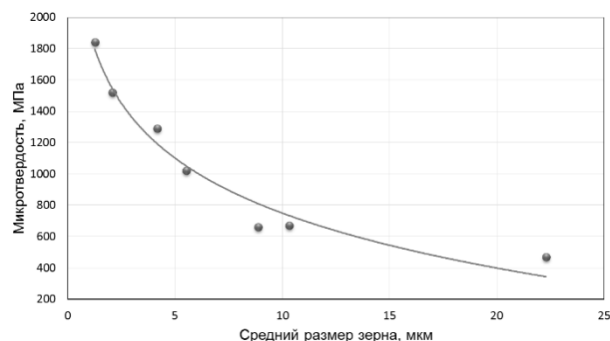


Рисунок 5. График зависимости микротвердости от среднего размера зерен алюминиевого сплава АМЦ

Из рисунка 5 можно увидеть обратную зависимость микротвердости от размера зерен, т.е. с уменьшением зерен микротвердость сплава увеличивается. Это связано с особым состоянием кристаллической решетки в зернах и структурой межзеренных границ [9].

Таким образом, методом оптической микроскопии установлено, что при равноканальном угловом прессовании при комнатной температуре в алюминиевом сплаве АМЦ происходит измельчение зерна исходного материала до размеров 1,0–1,5 мкм. В результате равноканального углового прессования микротвердость сплава АМЦ возрастает почти в 4,5 раза относительно исходного состояния.

Известно, что эффективным методом повышения деформируемости сплавов является создание мелкозернистой структуры, способствующей проявлению эффекта сверхпластичности [10–12]. Была поставлена задача повышение предела прочности алюминиевого сплава АМЦ при сохранении или увеличении пластичности. Получение сплава с такими свойствами позволит во многих случаях заменить дорогостоящие алюминиевые сплавы, типа 1575. В связи с этим были исследованы механические свойства сплава АМЦ до и после РКУП.

На рисунке 6 представлены деформационные кривые сплава АМЦ в исходных состояниях и после РКУП.

Сравнение данных кривых указывает на существенное различие прочностных характеристик исходных и деформированных РКУП образцов сплава АМЦ. Отличительными чертами также являются протяженность стадии деформационного упрочнения. Из формы кривых следует, что деформационное упрочнение на стадии пластического течения в РКУП образцах меньше, чем в исходном состоянии.

В таблице 2 приведены механические свойства образцов сплава АМЦ до и после РКУП. После РКУП-12 сплава АМЦ, возрастают его предел прочности от 91 МПа до 297 МПа, и предел текучести от 75 МПа до 297 МПа.

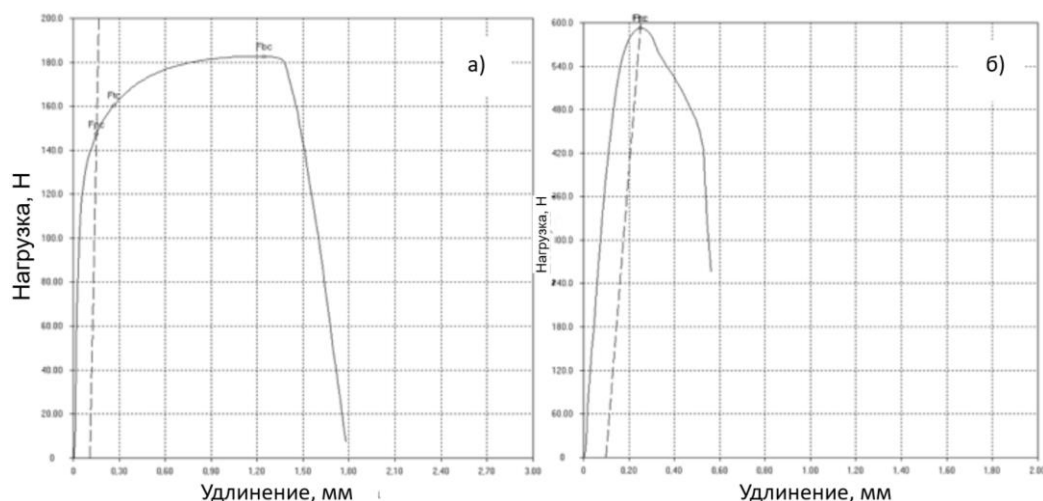


Рисунок 6. Деформационные кривые сплава АМЦ в исходном состоянии (а) и после РКУП-12 (б)

В то время как значения прочностных характеристик повышаются, пластичность сплава АМЦ падает при переходе в ультрамелкозернистое состояние при РКУП. Значение удлинения до разрушения образцов сплава АМЦ – до 40%.

Таблица 2. Механические свойства образцов сплава АМЦ

Сплав до и после испытаний	Механические свойства		
	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
АМЦ – исходный	91	75	5
АМЦ – РКУП-12	297	297	3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя полученные в работе результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что наиболее интенсивное измельчение зёрненной структуры в алюминиевом сплаве АМЦ происходит при РКУП 12 проходов, при пересечении угла каналов на 120°. После РКУП-12 в алюминиевом сплаве происходит измельчение зерна исходного материала до размеров ~1,0–1,5 мкм.

2. Установлено, что при РКУП с углом пересечения каналов 120°, при котором число циклов обработки достигало 12 при $e = 8,4$, появилась возможность

получить бездефектные заготовки с более однородной структурой.

3. Определено, что в результате равноканального углового прессования микротвердость сплава АМЦ возрастает почти в 4,5 раза, по сравнению с исходным состоянием; Показано, что с уменьшением размеров зерен микротвердость увеличивается.

4. Показано, что после РКУП-12 улучшается износостойкость алюминиевого сплава АМЦ на 13–14%, которая подтверждается снижением потери массы до 5,4–5,6 мг по результатам испытания на абразивное изнашивание.

5. Обнаружено, что деформационные кривые сплава АМЦ в исходных состояниях и после РКУП показали на существенное различие прочностных характеристик исходных и деформированных РКУП образцов сплава АМЦ. Деформационное упрочнение на стадии пластического течения в РКУП образцах меньше, чем в исходном состоянии.

6. Определено, что после РКУП-12 сплава АМЦ возрастает его предел прочности – с 91 МПа до 297 МПа и предел текучести – с 75 МПа до 297 МПа.

7. Показано, что после РКУП прочностные характеристики сплава АМЦ повышаются, а пластичность падает при переходе в ультрамелкозернистое состояние при РКУП.

ЛИТЕРАТУРА

- Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation // Progress in Materials Science V. 45, P. 103–189 (2000).
- Gorelik S.S., Dobatkin C.B., Kaputkina J.M. Rekristallizatsiya metallov i spлавov 3-ye izd. M.: MISIS, P. 432 (2005) [in Russian].
- Storojeva L., Ponge D., Kaspar D., Raabe D. Development of microstructure and texture of medium carbon steel during heavy warm deformation // Acta Materialia 52, P. 2209–2220 (2004).
- Raabe D., Kumar R. Tensile deformation characteristics of bulk ultrafine-grained austenitic stainless steel produced by thermal cycling // Scripta Materialia 66, P. 634–637 (2012).
- Segal V.M. Razvitiye obrabotki materialov intensivnoy sdvigovoy deformatsiyey / V.M. Segal // Metally 1, P. 5–14 (2004) [in Russian].
- Grigorevich V.K. // Tverdest' i mikrotverdest' metallov. - M.: Nauka, P. 230 (1976) [in Russian].
- Valiyev R.Z., Aleksandrov I.V. Nanostrukturnyye materialy, poluchennyye intensivnoy plasticheskoy deformatsiyey. M.: Logos, P. 272 (2000) [in Russian].

8. Skakov, M., Rakhadilov, B., Scheffler, M., Batyrbekov, E. Microstructure and tribological properties of electrolytic plasma nitrided high-speed steel // *Materials Testing* 57(4), P. 360–364 (2015).
9. Uazyrkhanova G., Rakhadilov B., Myakinin A., Uazyrkhanova Zh. The Change in the Thin Structure and Mechanical Properties of Aluminum Alloys at Intensive Plastic Deformation // *Materials Science Forum* Submitted: 1662-9752, V. 906, P. 114–120 / Trans Tech Publications, Switzerland (2017).
10. Tereshchenko N.A., Yakovleva I.L., Zubkova T.A., Chukin M.V., and Koptseva N.V. Structure Levels of Pearlite Deformation in Carbon Steel of Eutectoid Composition // *The Physics of Metals and Metallography* V.114, 5, P. 430–439 (2013).
11. Belyakov A., Sakai T., Miura H., Kaibyshev R. Substructures and internal stresses developed under warm severe deformation of austenitic stainless steel // *Scripta Mater* Vol. 42, 4, P. 319–325 (2000).
12. Calcagnotto M., Adachi Y., Ponge D., Raabe D. Deformation and fracture mechanisms in fine- and ultrafine-grained ferrite/martensite dual-phase steels and the effect of aging // *Acta Materialia* 59, P. 658–670 (2011).

ТЕЦКАНАЛДЫ БҰРЫШТЫҚ ПРЕСТЕУ РЕЖИМДЕРІНІҢ АМЦ ҚОРЫТПАСЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН ҚАСИЕТТЕРІН ҚАЛЫПТАСУЫНА ӘСЕРІ

¹⁾ Б.К. Рахадиллов, ¹⁾ Г.Б. Ботабаева, ¹⁾ М.С. Жапарова, ²⁾ Г.К. Уазырханова, ²⁾ Л.Б. Баятанова

¹⁾ С. Аманжолов атындағы Шығыс-Қазақстан мемлекеттік университеті, Өскемен, Қазақстан

²⁾ Д. Серікбаев Атындағы, Шығыс Қазақстан мемлекеттік техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Бұл жұмыста ультраұсақтүйіршікті құрылымды қалыптастыру ерекшеліктері және тецканалды бұрыштық нығыздау (ТКБН) әдісімен өңделген АМЦ алюминий қорытпасының механикалық қасиеттерін арттыру заңдылықтары қарастырылған. АМЦ алюминий қорытпасының құрылымы мен механикалық сипаттамаларының (микроқаттығы мен тозуға төзімділігі) өзгеруін, өту санына және ТКБН кезінде престеу арналары арасындағы бұрышқа байланысты жүйелі түрде зерттеу жүргізілді. Жұмыста өтпе жолдар санының өзгеруі есебінен түйіршіктердің әр түрлі өлшемі мен механикалық сипаттамалардың әр түрлі мәндерін алуға болады. Түйіршіктер мөлшерінің азаюымен АМЦ қорытпасының микро қаттылығы бастапқы жағдаймен салыстырғанда 4,5 есе артатыны анықталды. ТКБН-12 кейін массаның жоғалуы төмендейді, бұл АМЦ қорытпасының тозуға төзімділігінің 13–14% артуын көрсетеді. АМЦ ТКБН кейін беріктік сипаттамалары жоғарылайды, ультракүлгін күйге өту кезінде икемділік төмендейді.

Кілт сөздер: деформация, алюминий қорытпасы, құрылымы, беріктігі, илектенушілік.

INFLUENCE OF EQUAL-CHANNEL ANGULAR COMPRESSION MODES ON THE FORMATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE AMts ALLOY

¹⁾ B.K. Rakhadilov, ¹⁾ G.B. Botabaeva, ¹⁾ M.S. Zhaparova, ²⁾ G.K. Uazyrkhanova, ²⁾ L.B. Bayatanova

¹⁾ S. Amanzholov East Kazakhstan State University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

²⁾ D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

In this work the peculiarities of formation ultrathin-grained structure and regularities of mechanical properties improvement of aluminum alloy AMЦ, processed by equal channel angular pressing (ECAP). A systematic study of changes in the structure and mechanical characteristics (microhardness and wear resistance) of the AMЦ aluminum alloy, depending on the number of passes and the angle between the pressing channels at the ECAP. The work shows that by varying the number of passes, different grain sizes and different values of mechanical characteristics can be obtained. It was found that with a decrease in grain size, the microhardness of the AMЦ alloy increases by 4.5 times compared to the initial state. It is shown that after ECAP-12, the mass loss decreases, which shows an increase in the wear resistance of the AMЦ alloy by 13–14%. It was identified that after the ECAP of the AMЦ, the strength characteristics increase, and the plasticity decreases when the transition to the ultrathin-grained state.

Keywords: deformation, aluminum alloy, structure, strength, plasticity.