

Г.К. Уазырханова¹, Б.К. Рахадиллов¹, В.К. Виелеба², Ж.К. Уазырханова¹

¹Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан;

²Вроцлавский политехнический университет, Польша

(E-mail: GUazyrhanova@mail.ru)

Структура и механические свойства алюминиевых сплавов АМЦ и АМГ6 после пластической деформации

Статья посвящена усовершенствованию метода РКУП применительно к алюминиевым сплавам и исследованию влияния пластической деформации на структуру и механические свойства алюминиевых сплавов АМЦ и АМГ6. На основе экспериментальных исследований выбраны оптимальный способ и режимы РКУП алюминиевых сплавов АМГ6 и АМЦ, которые позволяют получить заготовку с повышенными механическими характеристиками. Наиболее интенсивное измельчение зеренной структуры в алюминиевых сплавах АМЦ и АМГ6 происходит при РКУП за 12 проходов, при пересечении угла каналов на 120° . После РКУП-12 в алюминиевых сплавах происходит измельчение зерна исходного материала до размеров $\sim 1,0\text{--}1,5$ мкм. 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. В результате равноканального углового прессования микротвердость сплава АМГ6 по сравнению с исходным состоянием возрастает почти в 4 раза, а микротвердость сплава АМЦ — почти в 4,5 раза. После РКУП-12 потеря массы снижается до 5,4–5,6 мг, что показывает увеличение износостойкости алюминиевых сплавов АМГ6 и АМЦ на 13–14 %. После РКУП-12 сплава АМЦ возрастают его предел прочности — от 91 МПа до 297 МПа и предел текучести — от 75 МПа до 297 МПа. После РКУП-12 сплава АМГ6 возрастают его предел прочности — от 359 МПа до 565 МПа и предел текучести — от 279 МПа до 565 МПа. Значение удлинения до разрушения образцов сплавов АМЦ и АМГ6 уменьшается до 40 % и 20 % соответственно.

Ключевые слова: деформация, прессование, алюминиевый сплав, микротвердость, износостойкость, масса сплава.

Введение

Как известно, наиболее перспективным методом получения СМК и НК материалов служит интенсивная пластическая деформация (ИПД) [1–4]. Интенсивная пластическая деформация — сложный физико-химический процесс, в результате которого наряду с изменением формы и строения исходного состояния меняются его физико-химические и механические свойства. Полученные с помощью метода ИПД ультрамелкозернистые материалы с размером зерна менее 1 мкм обладают высокой прочностью и значительной ударной вязкостью по сравнению с традиционными композициями стали, и эти материалы в настоящее время являются предметом обширных исследований во всем мире [5–7]. Один из известных методов ИПД, позволяющий обеспечить высокую интенсивность и более однородное деформированное состояние, — равноканальное угловое прессование (РКУП) [8]. Не менее важным направлением научных исследований также является изучение ультрамелкозернистых алюминиевых сплавов. Как известно, производство изделий и полуфабрикатов из алюминиевых сплавов развивается быстрее многих других отраслей металлургической промышленности и по объему занимает в настоящее время первое место среди производства других цветных металлов и второе — после производства стали и чугуна [9–10].

В связи с изложенным выше целью настоящей работы является усовершенствование метода РКУП применительно к алюминиевым сплавам и исследования влияния пластической деформации на структуру и механические свойства алюминиевых сплавов АМЦ и АМГ6.

Материал и методы исследования

В качестве материала исследования были выбраны алюминиевые сплавы АМЦ и АМГ6. Химический состав алюминиевых сплавов: АМЦ — 96,35–99 % Al; 1–1,5 % Mn; 0,6 % Si; 0,7 % Fe; 0,05–0,2 % Cu; 0,1 % Zn, АМГ6-91.1–93 % Al; 0,5–0,8 % Mn; 0,4 % Si; 0,4 % Fe; 0,1 % Cu; 0,2 % Zn; 5,8–6,8 % Mg.

Экспериментальные исследования и механические испытания проводили в лабораториях научно-исследовательского института «Нанотехнологии и новые материалы» и Региональной университетской лаборатории инженерного профиля «IPGETAC» Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. Микроструктуру алюминиевых сплавов исследовали методом оптической микроскопии на НЕОРНОТ–21. Измерение микротвердости образцов проводили по методу Виккерса на микротвердомере ПМТ-3, при нагрузке на индентор $P = 1$ Н и времени выдержки при этой нагрузке 10 сек. Трибологические испытания проводились на воздухе по схеме «шарик – диск». В качестве машины трения использовался трибометр «Tribometer». В качестве контртела использовался шарик диаметром 3.0 мм, изготовленный из спеченного сертифицированного материала. Нагрузка составляла 1.0 Н, скорость скольжения 10 см/с. Испытания соответствуют международным стандартам ASTM G99-959, DIN50324 и ISO 20808.

Результаты и их обсуждения

Одной из задач данной работы является усовершенствование метода РКУП применительно к алюминиевым сплавам, которое состоит в определении режимов, обеспечивающих получение цельных бездефектных объемных заготовок, и в исследовании влияния параметров процесса на формирующуюся структуру. Исследования проводились на сплавах разных составов — АМГ6 и АМЦ, деформационное поведение которых близко друг к другу. Важным параметром РКУП является угол пересечения каналов — Φ . Он определяет степень деформации за один цикл обработки (e) и накопленную деформацию (e_N) при нескольких циклах. Исследования влияния величины углов пересечения, каналов на деформируемость представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Влияние угла пересечения каналов при РКУП сплава АМГ6 при комнатной температуре на деформированное состояние при многоцикловогой обработке

Угол пересечения каналов, Φ , °	Степень деформации за один цикл, e	Максимальное количество циклов до разрушения заготовки (N)	Максимально накапливаемая деформация (e_N)
90	1,15	4	4.6
120	0,67	12	8

Были проведены исследования по влиянию угла пересечения каналов на деформируемость сплава АМГ6. В результате проведенных исследований выявили, что при угле пересечения каналов, равном 90° ($e = 1,15$), заготовка разрушалась уже после четвертого цикла прессования.

Со снижением интенсивности воздействия за цикл прессования повысилась деформируемость сплава АМГ6. Лучшие результаты были получены при РКУП с углом пересечения каналов 120° , при котором число циклов обработки достигало 12, при $e = 8$. При таких режимах появилась возможность получить бездефектные заготовки с более однородной структурой.

Таким образом, в результате проведенных исследований был разработан процесс формирования УМЗ структуры в алюминиевом сплаве АМГ6 и были получены бездефектные образцы со средним размером зерен $\sim 0,5$ мкм. Такое структурное состояние обеспечило повышение микротвердости сплава АМГ6 в среднем до 3800 МПа. Конструктивные особенности созданной оснастки обеспечивали многоцикловую обработку заготовок из алюминиевых сплавов без разрушения и поверхностных дефектов.

Исследования и сравнительный анализ показывают, что наиболее рациональным углом пересечения каналов является угол $\Phi = 120^\circ$, при котором обеспечивается получение бездефектных заготовок при максимально высоком уровне накопленной деформации ($e = 8$).

Учитывая данные предварительных экспериментов, были выбраны режимы РКУП сплавов АМГ6 и АМЦ (табл. 2), по которым получены партии заготовок для дальнейших исследований. Дан-

ные режимы позволили выявить отдельно влияние степени деформации (количества циклов) при прочих равных условиях на микроструктуру и физико-механические свойства алюминиевых сплавов.

Т а б л и ц а 2

Режимы РКУП сплавов АМГ6 и АМЦ (маршруты В и С)

Алюминиевый сплав	Ф	Количество циклов (проходов) и накопленная деформация $N(\epsilon_N)$
АМГ6	90	2 (2.3)
	90	4 (4.6)
	120	2 (1.34)
	120	4 (2.68)
	120	8 (5.36)
	120	12 (8)
АМЦ	90	2 (2.3)
	90	4 (4.6)
	120	2 (1.34)
	120	4 (2.68)
	120	8 (5.36)
	120	12 (8)

Согласно результатам оптической микроскопии для алюминиевых сплавов АМЦ и АМГ6 в исходном состоянии характерна преимущественно равноосная форма зерен (рис. 1).

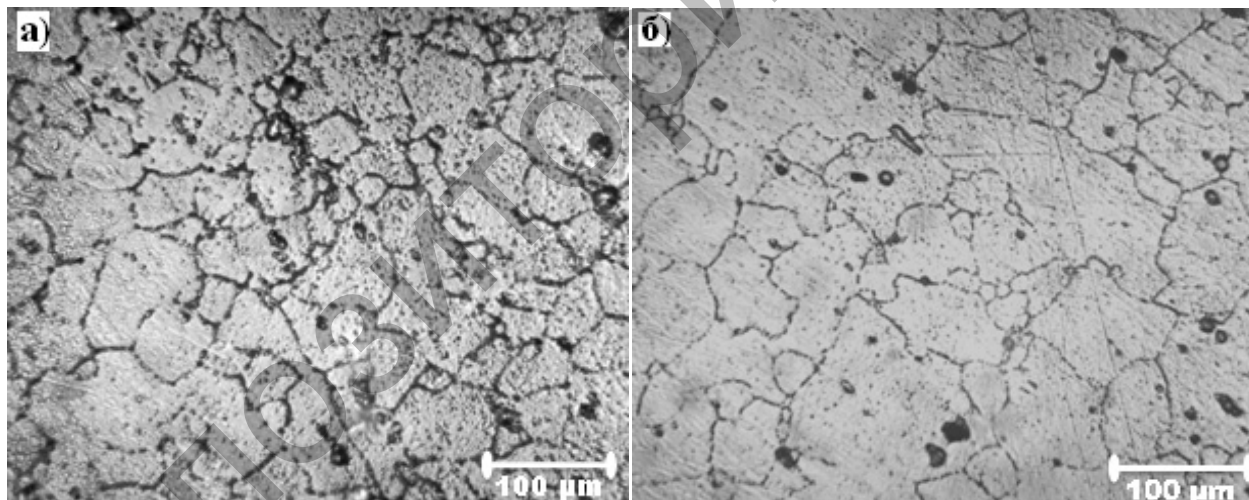


Рисунок 1. Микроструктура алюминиевых сплавов АМГ6 (а) и АМЦ (б) в исходном состоянии

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 алюминиевых сплавах АМЦ и АМГ6 происходит при РКУП-12 проходов, при пересечении угла каналов на 120° . После РКУП-12 в алюминиевых сплавах происходит измельчение зерна исходного материала до размеров $\sim 1,0-1,5$ мкм. Эти результаты показывают, что средний размер зерен для сплава АМЦ уменьшился почти в 13 раз по сравнению с исходным состоянием, а для сплава АМГ6 уменьшился почти в 17 раз. При РКУП-8 проходов, при пересечении угла каналов на 120° в обоих алюминиевых сплавах, средний размер зерен в два раза больше, чем при РКУП-12 проходов.

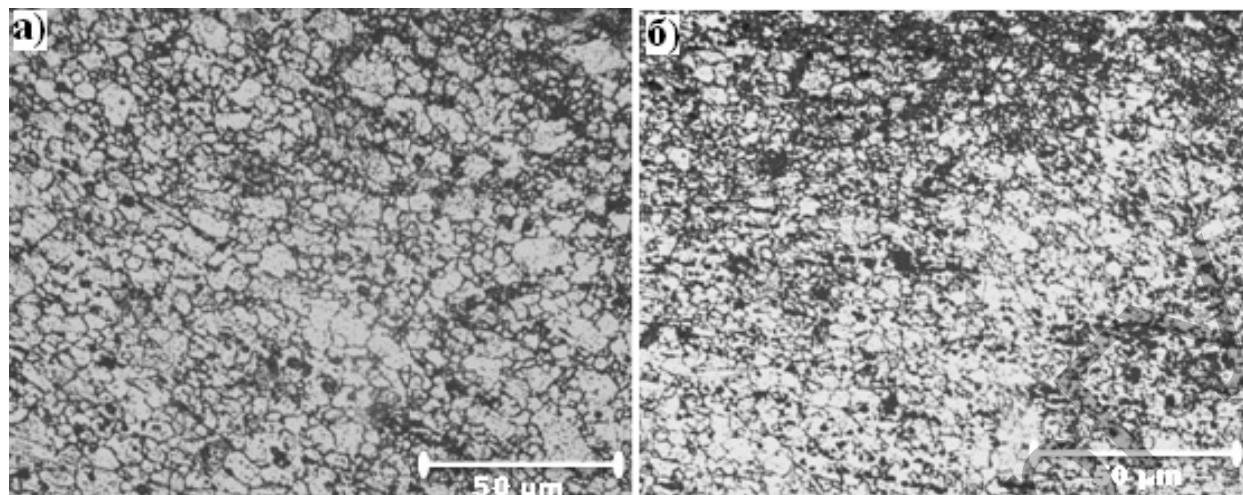


Рисунок 2. Микроструктура алюминиевых сплавов АМЦ (а) и АМГ6 (б) после РКУП-12 проходов, при пересечении угла каналов на 120°

На рисунке 3 представлены гистограммы микротвердости по Виккерсу для алюминиевых сплавов АМЦ и АМГ6. После РКУП наблюдается увеличение микротвердости в зависимости от количества проходов. При этом в образцах, 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 возможность 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. Определено, что в результате РКУП (12 проходов) микротвердость сплава АМГ6 возрастает до величины 1640 МПа, что почти в 4 раза выше, чем в исходном состоянии. В результате РКУП (12 проходов) микротвердость сплава АМЦ возрастает до величины 1820 МПа, что почти в 4,5 раза выше, чем в исходном состоянии.

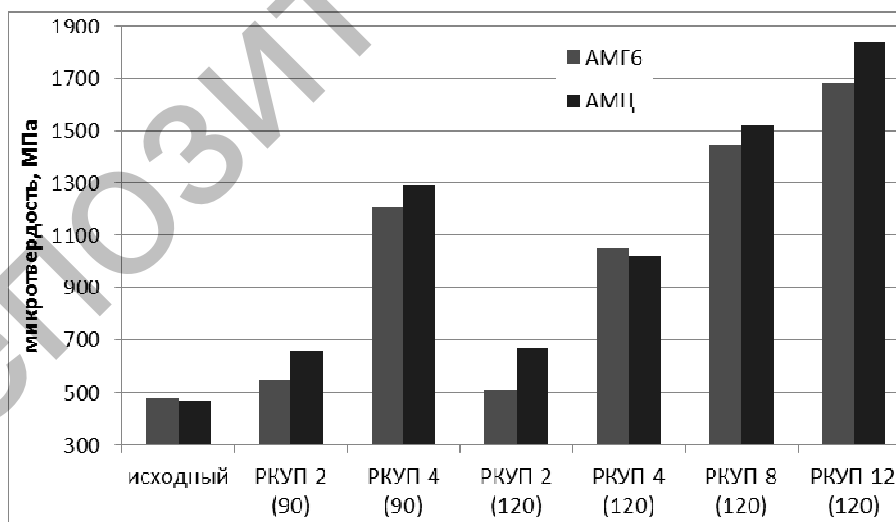


Рисунок 3. Микротвердость сплавов АМГ6 и АМЦ до и после РКУП

Выявлено, что измельчение структуры при РКУП сопровождается ростом микротвердости в алюминиевых сплавах АМЦ и АМГ6.

На рисунке 4 показаны значения потери массы образцов сплавов АМГ6 и АМЦ до и после РКУП при разных режимах. Видно, что изменение потеря массы после РКУП незначительны 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 алюминиевых сплавов АМГ6 и АМЦ на 13–14 %.

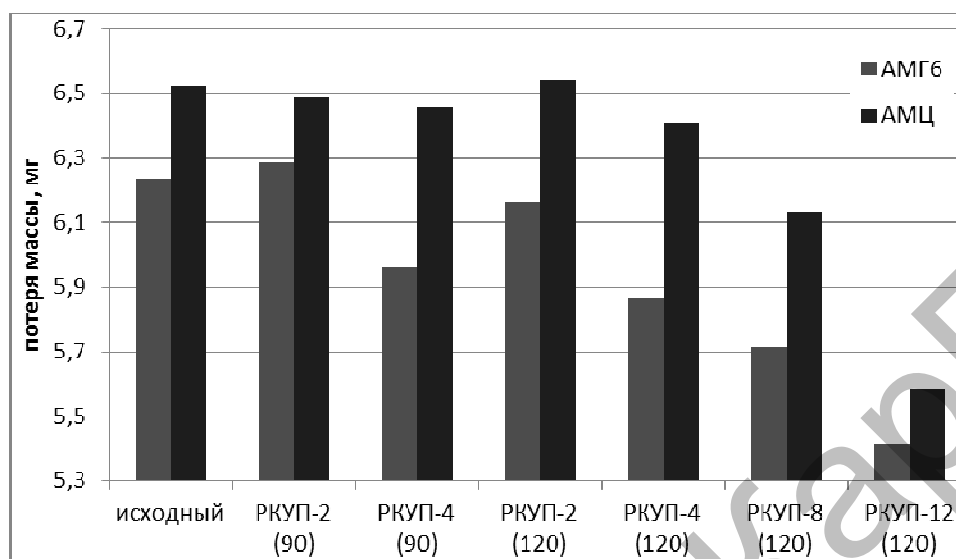


Рисунок 4. Износостойкость сплавов АМГ6 и АМЦ до и после РКУП

В таблице 3 показаны экспериментальные данные о структуре и свойствах алюминиевых сплавов, полученных после РКУП при разных режимах. Результаты экспериментов наглядно иллюстрируют корреляцию между структурными и механическими характеристиками обработанных сплавов.

Т а б л и ц а 3

Экспериментальные данные о структурных и механических характеристиках обработанных алюминиевых сплавов методом РКУП

Сплав	Ф	Режимы РКУП	Маршрут	Микротвердость, МПа	Износостойкость (потеря массы), мг	Средний размер зерен, $d_{ср}$, мкм
АМГ6		Исходный	-	480	6,235	18,7
	90	РКУП-2	С	545	6,286	9,14
	90	РКУП-4	В	1210	5,963	4,17
	120	РКУП-2	С	510	6,165	10,89
	120	РКУП-4	В	1050	5,869	5,33
	120	РКУП-8	В	1450	5,716	3,12
	120	РКУП-12	В	1680	5,414	1,51
АМЦ		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

Свойства определяются характером формирующейся в процессе обработки структуры. Нами проведено систематическое исследование изменения структуры и механических характеристик (микротвердость и износостойкость) алюминиевых сплавов 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, четко прослеживается зависимость микротвердости от среднего размера зерен. На рисунке 5 показан график зависимости микротвердости от сред-

него размера зерен алюминиевых сплавов АМГ6 и АМЦ. Из рисунка можно увидеть обратную зависимость микротвердости от размера зерен. То есть с уменьшением зерен микротвердость сплавов увеличивается. Это связано с особым состоянием кристаллической решетки в зернах и структурой межзеренных границ, что обсуждалось выше.

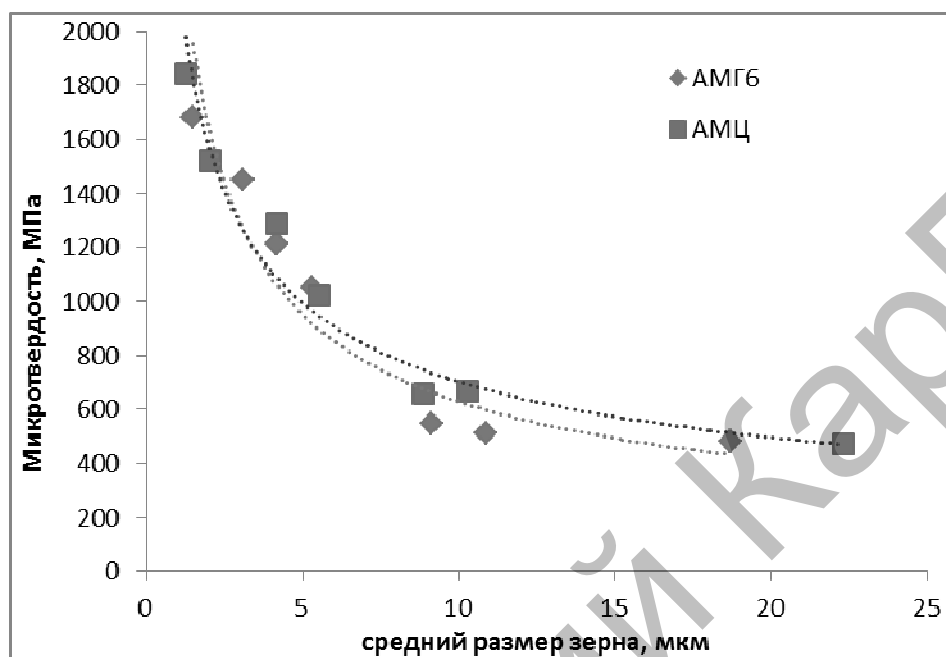


Рисунок 5. График зависимости микротвердости от среднего размера зерен алюминиевых сплавов АМЦ и АМГ6

Таким образом, методом оптической микроскопии установлено, что при равноканальном угловом прессовании при комнатной температуре в алюминиевых сплавах АМЦ и АМГ6 происходит измельчение зерна исходного материала до размеров 1,0–1,5 мкм. В результате равноканального углового прессования микротвердость сплава АМГ6 по сравнению с исходным состоянием возрастает почти в 4 раза, а микротвердость сплава АМЦ — почти в 4,5 раза.

Известно, что эффективным методом повышения деформируемости сплавов является создание мелкозернистой структуры, способствующей проявлению эффекта сверхпластичности. Основной задачей работы являлось повышение предела прочности алюминиевых сплавов АМГ6 и АМЦ при сохранении или увеличении пластичности. На рисунке 6 представлены деформационные кривые сплавов АМГ6 и АМЦ в исходных состояниях и после РКУП.

Сравнение данных кривых указывает на существенное различие прочностных характеристик исходных и деформированных РКУП образцов сплавов АМЦ и АМГ6. 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 4 приведены механические свойства образцов сплавов АМЦ и АМГ6 до и после РКУП. После РКУП-12 сплава АМЦ его предел прочности возрастает от 91 МПа до 297 МПа, а предел текучести — от 75 МПа до 297 МПа. После РКУП-12 сплава АМГ6 его предел прочности возрастает от 359 МПа до 565 МПа, а предел текучести — от 279 МПа до 565 МПа.

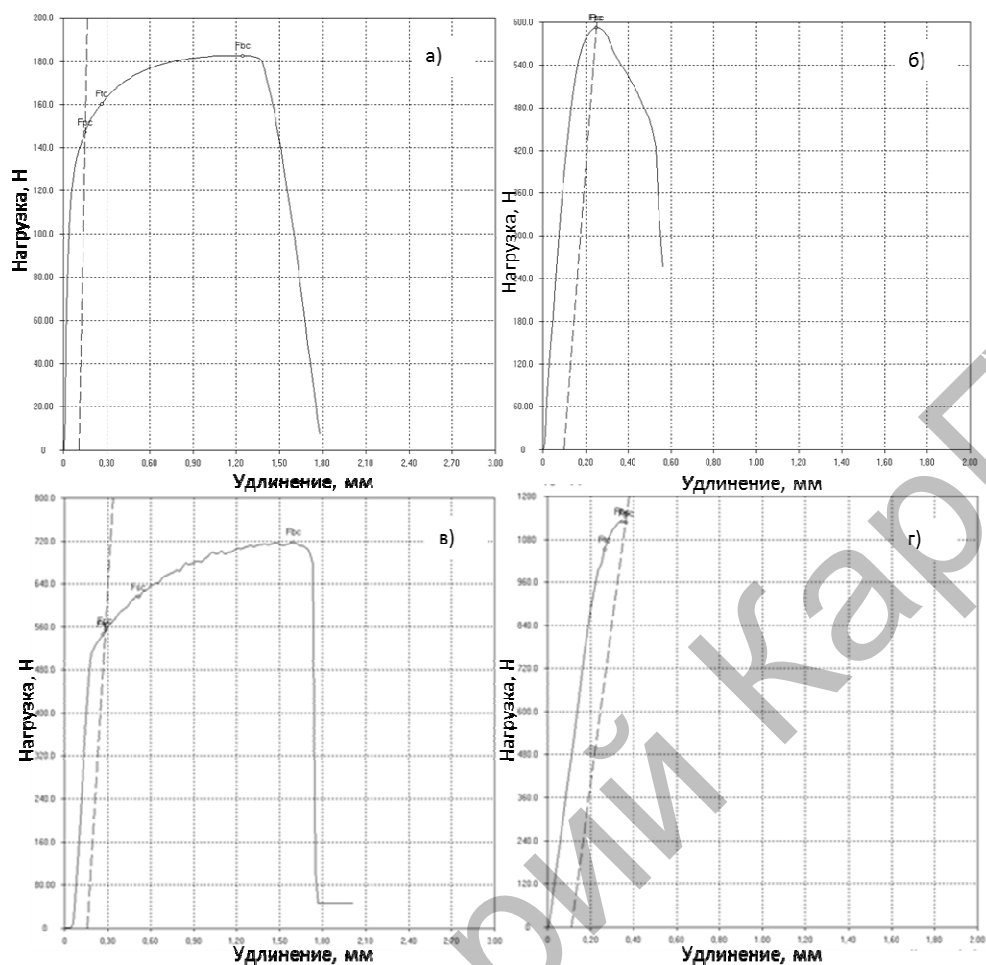


Рисунок 6. Деформационные кривые сплавов АМЦ (а, б) и АМГ6 (в, г) в исходном состоянии (а, в) и после РКУП-12 (б, г)

В то время как значения прочностных характеристик повышаются, пластичность сплавов АМЦ и АМГ6 падает при переходе в ультрамелкозернистое состояние при РКУП. Значение удлинения до разрушения образцов сплавов АМЦ и АМГ6 уменьшается до 40 % и 20 %, соответственно.

Таблица 4

Механические свойства образцов сплавов АМЦ и АМГ6

Механические свойства	АМЦ-исходный	АМЦ-РКУП-12	АМГ6-исходный	АМГ6-РКУП-12
Предел прочности, (МПа)	91	297	359	565
Предел текучести, (МПа)	75	297	279	565
Относительное удлинение (%)	5	3	10	8

Заключение

Таким образом, на основании анализа полученных результатов усовершенствования метода РКУП применительно к алюминиевым сплавам и исследования влияния пластической деформации на структуру и механические свойства алюминиевых сплавов АМЦ и АМГ6 можно сделать следующие выводы:

– на основе экспериментальных исследований выбран оптимальный способ и режимы РКУП алюминиевых сплавов АМГ6 и АМЦ, которые позволяют получить заготовку с повышенными механическими характеристиками;

– установлено, что наиболее интенсивное измельчение зеренной структуры в алюминиевых сплавах АМЦ и АМГ6 происходит при РКУП 12 проходов, при пересечении угла каналов на 120° . После РКУП-12 в алюминиевых сплавах происходит измельчение зерна исходного материала до размеров $\sim 1,0\text{--}1,5$ мкм;

– 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;

– определено, что в результате равноканального углового прессования микротвердость сплава АМГ6 возрастает почти в 4 раза, по сравнению с исходным состоянием; микротвердость сплава АМЦ увеличивается почти в 4,5 раза. Показано, что с уменьшением размеров зерен микротвердость увеличивается;

– показано, что после РКУП-12 потеря массы снижается до 5,4–5,6 мг, что свидетельствует об увеличении износостойкости алюминиевых сплавов АМГ6 и АМЦ на 13–14 %;

– определено, что деформационные кривые сплавов АМГ6 и АМЦ в исходных состояниях и после РКУП показали существенное различие прочностных характеристик исходных и деформированных РКУП образцов сплавов АМЦ и АМГ6. 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;

– установлено, что после РКУП-12 сплава АМЦ его предел прочности возрастает от 91 МПа до 297 МПа, а предел текучести — от 75 МПа до 297 МПа. После РКУП-12 сплава АМГ6 его предел прочности возрастает от 359 МПа до 565 МПа, а предел текучести — от 279 МПа до 565 МПа;

– показано, что после РКУП АМЦ и АМГ6 прочностные характеристики повышаются, пластичность сплавов АМЦ и АМГ6 падает при переходе в ультрамелкозернистое состояние при РКУП. Значение удлинения до разрушения образцов сплавов АМЦ и АМГ6 уменьшается до 40 % и 20 % соответственно.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки МОН РК по теме «Получение субмикроструктурных алюминиевых сплавов с высокими физико-механическими свойствами методом интенсивной пластической деформации».

Список литературы

- 1 Валиев Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р.З. Валиев, И.В. Александров. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. — 398 с.
- 2 Tereshchenko N.A. Structure Levels of Pearlite Deformation in Carbon Steel of Eutectoid Composition / N.A. Tereshchenko, I.L. Yakovleva, T.A. Zubkova, M.V. Chukin, N.V. Koptseva // The Physics of Metals and Metallography. — 2013. — Vol. 114. — No. 5. — P. 430–439.
- 3 Belyakov A. Substructures and internal stresses developed under warm severe deformation of austenitic stainless steel / A. Belyakov, T. Sakai, H. Miura, R. Kaibyshev // Scripta Mater. — 2000. — Vol. 42. — No. 4. — P. 319–325.
- 4 Calcagnotto M. Deformation and fracture mechanisms in fine — and ultrafine-grained ferrite/martensite dual-phase steels and the effect of aging / M. Calcagnotto, Y. Adachi, D. Ponge, D. Raabe // ActaMaterialia. — 2011. — № 59. — P. 658–670.
- 5 Song R. Grain boundary characterization and grain size measurement in an ultrafine-grained steel / R. Song, D. Ponge, D. Kaspar, D. Raabe // Z. Metallkd. — 2004. — No. 95. — P. 513–517.
- 6 Song R. Overview of processing, microstructure and mechanical properties of ultrafine grained bcc steels / R. Song, D. Ponge, D. Raabe, J. Speer, D. Matlock // Materials science and Engineering A. — 2006. — № 441. — P. 1–17.
- 7 Storoyeva L. Development of microstructure and texture of medium carbon steel during heavy warm deformation / L. Storoyeva, D. Ponge, D. Kaspar, D. Raabe // ActaMaterialia. — 2004. — № 52. — P. 2209–2220.
- 8 Gholinia P.B. The effect of strain path on the development of deformation structures in severely deformed aluminium alloys processed by ECAE / P.B. Gholinia, M.V. Prangnell, Markushev // Acta Materialia. — 2000. — Vol. 48. — Issue 5. — P. 1115–1130.
- 9 Фридляндер И.Н. Алюминиевые сплавы — перспективный материал в автомобилестроении / И.Н. Фридляндер, В.Г. Систер, О.Е. Грушко, В.В. Берстнев, Л.М. Шевелева, Л.А. Иванова // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2002. — № 9. — С. 3–9.
- 10 Елагин В.И. Конструкционные наноструктурные сплавы на алюминиевой основе // Технология легких сплавов. — 2008. — № 2. — С. 6–20.

Г.К. Уазырханова, Б.К. Рахадиллов, В.К. Виелеба, Ж.К. Уазырханова

Пластикалық өзгерістен кейінгі АМО және АМГ6 алюминий қорытпаларының құрылымы және механикалық қасиеттері

Мақала алюминий қорытпаларына қатысты теңканалды бұрыштық пресеу (ТКБП) әдісінің қолданылуын жетілдіру және пластикалық деформацияның АМЦ және АМГ6 алюминий қорытпаларының құрылымы мен механикалық қасиеттеріне тигізетін әсерін зерттеуге арналған. Эксперименттік зерттеулер негізінде АМЦ мен АМГ6 алюминий қорытпаларынан механикалық қасиеттері жоғары дайындамалар алуға арналған ТКБП-ның оңтайлы тәсілі мен тәртібі анықталды. АМЦ мен АМГ6 алюминий қорытпаларында ең ұсақ түйінді құрылымды арналардың 1200 бұрышпен қиылысуы кезінде және ТКБП-12 режимінде алуға болады. ТКБП-12 кейін алюминий қорытпаларындағы түйіндердің ұсақталуы $\sim 1,0\text{--}1,5$ мкм жетеді. Арналардың қиылысуы 120° ТКБП-12 және $e = 8,4$ тең өңдеу циклының саны 12 жеткенде біртекті құрылымы бар ақаусыз дайындамалар алуға мүмкіндік туды. Теңканалды бұрыштық пресеу нәтижесінде АМГ6 қорытпасының микроқаттылығы бастапқы жағдаймен салыстырғанда 4 есеге, ал АМЦ қорытпасының микроқаттылығы 4,5 есеге жоғарылады. ТКБП-12 кейін қорытпа массасы 5,4–5,6 мг төмендеп, ал АМГ6 және АМЦ қорытпаларында тозуға төзімділіктің 13–14 % артуына әкеп соғады. ТКБП-12 кейін АМЦ қорытпасының беріктілік шегі 91 МПа-ден 297 МПа дейін, ал аққыштық шегі 75 МПа-ден 297 МПа дейін артады. ТКБП-12 кейін АМГ6 қорытпасының беріктілік шегі 359 МПа-ден 565 МПа дейін, ал аққыштық шегі 279 МПа-ден 565 МПа дейін жоғарылайды. АМЦ және АМГ6 қорытпаларының бұлінуге дейінгі ұзаруының мәні 40 % және 20 % дейін төмендейді.

Кілт сөздер: деформациялау, пресеу, алюминий қорытпасы, микроқаттылық, тозуға төзімділік, қорытпа массасы.

G.K. Uazyrkhanova, B.K. Rachadilov, V.K. Vieleba, Zh.K. Uazyrkhanova

Structure and mechanical properties of aluminum alloys AMC and AMG6 after plastic deformation

The article is devoted to the improvement of the ECAE method with reference to aluminum alloys and the study of the effect of plastic deformation on the structure and mechanical properties of aluminum alloys AMC and AMG6. On the basis of experimental studies, the optimal method and modes of ECAE of aluminum alloys AMG6 and AMC were studied, which allow to obtain a billet with increased mechanical characteristics. The most intensive grinding of the grain structure in aluminum alloys AMC and AMG6 occurs with ECAE 12 passes, with the intersection of the channel angle by 120° . After ECAE -12 in aluminum alloys, the grain of the initial material is ground to a size of $\sim 1.0\text{--}1.5$ μm . With ECAE with an intersection angle of 120° , at which the number of processing cycles reached 12 at $e=8.4$, it became possible to obtain defect-free preforms with a more homogeneous structure. As a result of equal-channel angular pressing, the microhardness of the AMG6 alloy increases almost 4-fold, compared with the initial state; The microhardness of the AMC alloy increases, which is almost 4.5 times higher than in the initial state. After ECAE-12, the mass loss is reduced to 5.4–5.6 mg, which shows an increase in wear resistance of aluminum alloys AMG6 and AMC by 13–14%. After ECAE -12, the AMC alloy increases its tensile strength from 91 MPa to 297 MPa, and the yield strength is from 75 MPa to 297 MPa. After ECAE -12, AMG6 alloy increases its tensile strength from 359 MPa to 565 MPa, and the yield strength is from 279 MPa to 565 MPa. The value of elongation before fracture of samples of AMC and AMG6 alloys decreases to 40 % and 20 %, respectively.

Keywords: deformation, pressing, aluminum alloy, microhardness, wear resistance, alloy weight.

References

- 1 Valiev, R.Z., & Aleksandrov, I.V. (2007). *Obemnye nanostrukturnye metallicheskie materialy: poluchenie, struktura i svoystva [Bulk nanostructured metallic materials: preparation, structure and properties]*. Moscow: IKTs «Akademkniha» [in Russian].
- 2 Tereshchenko, N.A., Yakovleva, I.L., Zubkova, T.A., Chukin, M.V., & Koptseva, N.V. (2013). Structure Levels of Pearlite Deformation in Carbon Steel of Eutectoid Composition. *The Physics of Metals and Metallography*, 114, 5, 430–439.
- 3 Belyakov, A., Sakai, T., Miura, H., & Kaibyshev, R. (2000). Substructures and internal stresses developed under warm severe deformation of austenitic stainless steel. *Scripta Mater*, 42, 4, 319–325.
- 4 Calcagnotto, M., Adachi, Y., Ponge, D., & Raabe, D. (2011). Deformation and fracture mechanisms in fine- and ultrafine-grained ferrite/martensite dual-phase steels and the effect of aging. *Acta Materialia*, 59, 658–670.

- 5 Song, R., Ponge, D., Kaspar, D., & Raabe, D. (2004). Grain boundary characterization and grain size measurement in an ultrafine-grained steel. *Z. Metallkd*, 5, 513–517.
- 6 Song, R., Ponge, D., Raabe, D., Speer, J., & Matlock, D. (2006). Overview of processing, microstructure and mechanical properties of ultrafine grained bcc steels. *Materials science and Engineering A*, 441, 1–17.
- 7 Storojeva, L., Ponge, D., Kaspar, D., & Raabe, D. (2004). Development of microstructure and texture of medium carbon steel during heavy warm deformation. *Acta Materialia*, 52, 2209–2220.
- 8 Gholinia, P.B. Prangnell, M.V. & Markushev (2000). The effect of strain path on the development of deformation structures in severely deformed aluminium alloys processed by ECAE. *Acta Materialia*, 48, 5, 1115–1130;
- 9 Fridlyander, I.N., Sister, V.G., Grushko, O.E., Bersstenev, V.V., Sheveleva, L.M., & Ivanova, L.A. (2002). Aluminium alloys a promising material in the automotive industry. *Metalovedenie i termicheskaja obrabotka metallov — Metal Science and Heat Treatment of Metals*, 9, 3–9 [in Russian].
- 10 Elagin, V.I (2008). Nanostructural structural alloys on an aluminum base. *Tekhnologiya lehkikh spлавov — Technology of light alloys*, 2, 6–20 [in Russian].

Репозиторий КарГУ