

УДК 880.3:539.386

**Л. Ф. Сенникова**, канд. техн. наук, **А. Н. Гангало**, канд. техн. наук,  
**Е. А. Свиридова**, канд. физ-мат. наук, **С. В. Васильев** канд. физ-мат. наук,  
**В. М. Ткаченко**, канд. физ-мат. наук  
ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина», ДНР, Россия,  
Тел. +7 949 3339801; Email: [ludsennikova@mail.ru](mailto:ludsennikova@mail.ru)

## ВЛИЯНИЕ РАЗОВОЙ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ ГИДРОЭКСТРУЗИЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА АМц, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБРАБОТАННОГО РАВНОКАНАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ ПРЕССОВАНИЕМ

*В статье рассмотрены результаты экспериментального исследования влияния разовой степени гидроэкструзии на структуру и механические свойства сплава АМц, предварительно деформированного равноканальным угловым прессованием и имеющего ультрамелкозернистую структуру. Установлено, что с увеличением степени разовой деформации гидроэкструзии, прочностные свойства сплава увеличиваются до 260,7 МПа при сохранении удовлетворительной пластичности материала. Методом рентгенографического анализа исследована тонкая структура сплава.*

**Ключевые слова:** сплав АМц, механические свойства, структура, прочность, твердость, гидроэкструзия, равноканальное угловое прессование.

**L. F. Sennikova, A. N. Gangalo, E. A. Sviridova, S. V. Vasiliev, V. M. Tkachenko,**

## THE EFFECT OF A SINGLE DEGREE OF DEFORMATION BY HYDROEXTRUSION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE AMc ALLOY PRETREATED BY EQUAL-CHANNEL ANGULAR PRESSING

*The article considers the results of an experimental study of the effect of a single degree of hydroextrusion on the structure and mechanical properties of an AMc alloy preformed by equal-channel angular pressing and having an ultrafine structure. It is established that with an increase in the degree of single deformation of hydroextrusion, the strength properties of the alloy increase before 260,7 MPa while maintaining satisfactory ductility of the material. The thin structure of the alloy has been studied by X-ray analysis*

**Keywords:** AMc alloy, mechanical properties, structure, strength, hardness, hydroextrusion, equal channel angular pressing.

### 1. Введение

Сплавы марки АМЦ характеризуются высокой коррозионной стойкостью, хорошей свариваемостью, имеют хорошую жаропрочность, но имеют низкие прочностные свойства.

Известно, что одним из перспективных способов, обеспечивающих повышение прочности алюминиевых сплавов, является получение ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры методами интенсивной пластической деформации (ИПД). Одним из таких методов является равноканальное угловое прессование (РКУП), которое позволяет обеспечить высокую интенсивность и более однородное деформированное состояние материала. [1] Это расширило бы область применения алюминиевых сплавов в конструкциях, особенно в автомобильной и аэрокосмической промышленности. Обзор последних достижений в области ИПД и свойств материалов после ИПД дан в работах [2, 3].

Однако методы ИПД не являются формообразующими, а предназначены для формирования структуры и свойств материала. Для дальнейшего же получения из этих заготовок изделий необходимо использовать традиционную обработку металлов давлением (ОМД). Поэтому в последнее время получение nano и ультрамелкозернистых металлов все больше концентрируется на комбинации методов ИПД и традиционных тех-

нологий обработки металлов давлением. В данном направлении проводятся многочисленные исследования.

В работах [4, 5] проведен анализ влияния комплексной обработки традиционных способов волочения и РКУП, на формирование ультрамелкозернистой структуры меди и ее способность достигать высокопрочного состояния в результате каждого из реализованных видов обработки. На примере медной проволоки исследованы особенности измельчения структурных составляющих и изменения механических свойств в ходе реализации разработанного авторами совмещенного процесса “РКУ-прессование–волочение”. Полученные результаты свидетельствуют об увеличении степени измельчения структуры меди как на поверхности, так и в центральных областях проволоки. Это свидетельствует о равномерности получаемой структуры по сечению, а, значит, о стабильности механических свойств получаемой проволоки с ультрамелкозернистой структурой.

Автором работ [6, 7] исследовано влияние нового совмещенного процесса пластической деформации “прокатка-РКУ-прессование” на структуру и механические свойства меди. Деформирование проводилось при комнатной температуре, количество циклов – 3. Показано, что “прокатка-РКУ-прессование” приводит к существенному измельчению структуры технически чистой меди. Прочность медных заготовок повышается после 3 проходов в 2 раза. Временное сопротивление разрыву и условный предел текучести увеличиваются с 235 до 482 МПа и с 198 до 405 МПа соответственно, относительное удлинение уменьшается на 8%, относительное сужение на 7%. Установлено, что ультрамелкозернистая структура со средним размером зерен 2 мкм устойчива к последующему нагреву вплоть до 150°C.

В работе [8] высокая прочность была успешно получена в сплаве Mg – 9Li с помощью РКУП при комнатной температуре и последующей прокатки. В результате получены ультратонкие зерна размером от 500 до 700 нм.

Одним из перспективных методов ОМД, как монотонной деформации, является гидроэкструзия (ГЭ). Особенностью метода является выдавливание заготовок жидкостью высокого давления. По сравнению с другими способами ОМД гидроэкструзия имеет ряд преимуществ. При ГЭ уменьшается необходимое усилие деформации по сравнению с обычным прессованием, увеличивается равномерность деформации, как в поперечном сечении, так и по длине заготовки, снижаются силы трения в очаге деформации и тем самым повышается качество получаемого изделия. Кроме того, гидроэкструзией при меньших энерго- и трудозатратах можно существенно повысить прочностные свойства материала.

Известно, что в процессе последующей за ИПД пластической деформации происходит изменение исходного УМЗ состояния структуры. Причем характер этих изменений определяется схемой и условиями деформации [1]. Поэтому исследования влияния деформации гидроэкструзией на структуру и механические свойства сплава АМц, предварительно деформированного РКУП, являются актуальными.

Цель данной работы – изучить влияние гидроэкструзии на структуру и механические свойства алюминиевого сплава АМц, предварительно подвергнутого РКУП.

## 2. Материал и методы исследования

Материалом для исследований служил промышленный горячепрессованный пруток алюминиевого сплава АМц диаметром 60 мм, который проточили до диаметра 56 мм и отожгли при температуре 400°C с выдержкой 1 час. Химический состав сплава приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав алюминиевого сплава АМц

Fe	Si	Mn	Al	Cu	Zn	Примесей
до 0,7	до 0,6	1 – 1.5	96,35 - 99	0,05 – 0,2	до 0,1	до 0,15

Термическую обработку образцов проводили в лабораторной печи СНОЛ – 7,2/1100. Затем заготовку деформировали гидроэкструзией за два перехода до диаметра 29 мм и 20 мм. После каждого перехода был отжиг 400<sup>0</sup>С, 1 час. Далее полученные образцы сплава АМц деформировали, используя восемь переходов РКУП и его комбинацию с гидроэкструзией с разовой степенью деформации  $e$  0,3; 0,6; 0,9; 1,2. Для исследования твердости заготовок после деформации и отжигов использовали твердомер Виккерса (HV 5).

Равноканальное угловое прессование осуществлялось с использованием прессы силой 100т.с. при комнатной температуре с использованием контейнера с рабочим диаметром каналов 20мм и углом пересечения  $\theta = 90^\circ$  по схеме В<sub>c</sub> (с поворотом заготовки на 90<sup>0</sup> вокруг своей оси). Деформация за один проход РКУП  $e \sim 1$ . Маршрут деформации В<sub>c</sub> является наиболее эффективным для получения равноосной ультрамелкозернистой структуры и обеспечивает наиболее высокие прочностные свойства материалов [1].

Гидроэкструзию осуществляли при комнатной температуре. Для реализации маршрута использовались контейнера высокого давления диаметрами 60, 32 и 20мм. Угол конуса матриц составлял  $2\alpha=20-30^\circ$ . В качестве рабочей жидкости было индустриальное масло И30. Для реализации процесса гидроэкструзии использовались прессы силой 500т.с. и 100т.с.

Механические испытания образцов сплава после деформации проводились на разрывной машине Р50 в соответствии с ГОСТом 1497 - 2023.

Структура образцов в исходном и деформированном состояниях исследовалась рентгенографически с помощью стандартного автоматизированного дифрактометра ДРОН-3М в фильтрованном СоК $\alpha$  излучении. Структурное состояние образцов характеризовалось средними размерами когерентно рассеивающих областей  $\langle D \rangle$  и величиной микронапряжений  $\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$ . Для определения значений этих параметров в работе использовался метод аппроксимации [9], в котором учитывались особенности условий съемки. Для анализа микроструктуры образцов сплава АМц использовались линии (111), (200), (222) и (400). В таком случае, общее число подгоночных параметров составляло 11: четыре интегральных амплитуды, четыре положения рефлексов, общее для всех рефлексов микронапряжение, размер блока и корректировочный параметр  $2\Delta s/R$ . Дифракционные картины снимались с продольного шлифа в направлении деформации гидроэкструзией. По дифракционным картинам определялась ширина дифракционных линий с индексами (111), (200), (222) и (400) (с учетом инструментального уширения), представляющих собой отражения различных порядков от кристаллографических плоскостей (100) и (111). Полученные таким образом значения ширины линий использовались для определения размеров о.к.р.  $\langle D_{HKL} \rangle$  и среднеквадратичного уровня микронапряжений  $\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$ . Расчёты проводились в предположении, что гауссовская форма профиля каждого рефлекса представляет собой свёртку профилей, формируемых микронапряжениями, и дисперсными размерами блоков мозаики.

### 3. Результаты и их обсуждения

На рисунке 1 показано влияние числа переходов и степени деформации РКУП на твердость сплава по Виккерсу. Твердость сплава после отжига  $400^{\circ}\text{C}$ , 1 час соответствовала значению 401 МПа. После первого перехода РКУП твердость значительно возрастает до значения 576 МПа, а на последующих переходах интенсивность увеличения твердости снижается. После 8 проходов интенсивной пластической деформации методом РКУП твердость алюминиевого сплава АМц повысилась до 650 МПа.

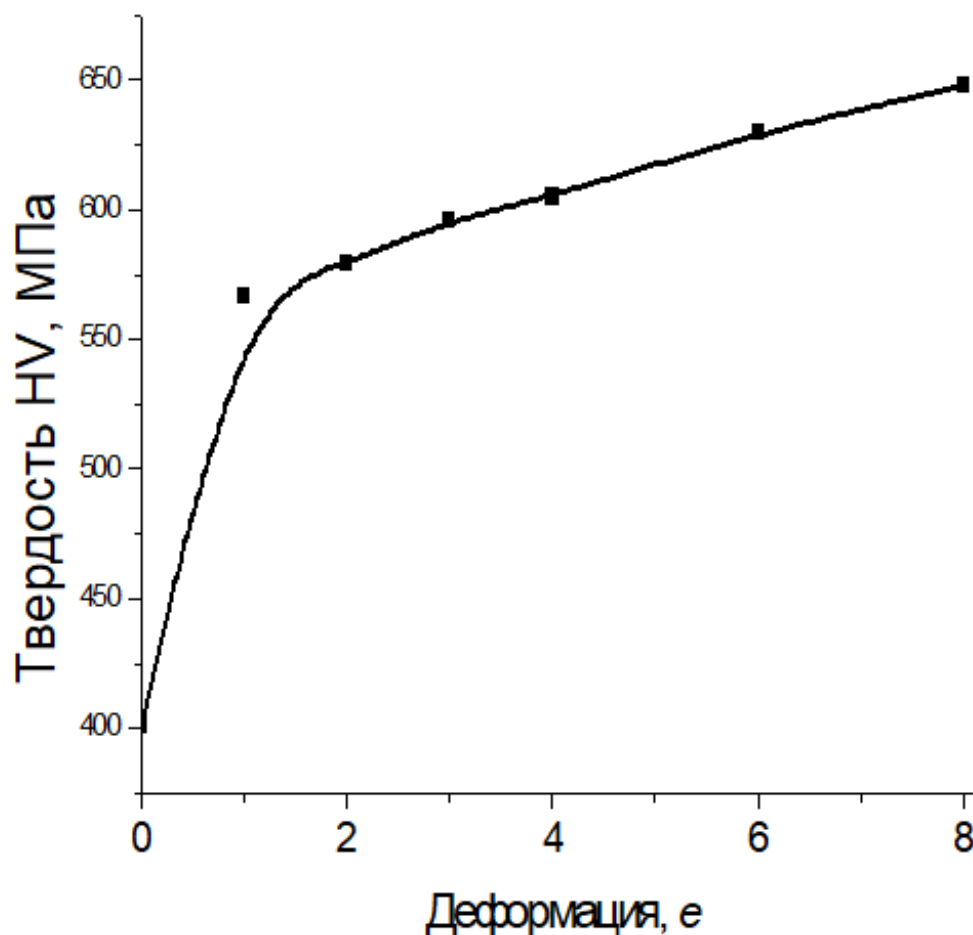


Рисунок 1. Зависимость твердости сплава АМц от степени деформации РКУП.

Дальнейшие исследования механических свойств алюминиевого сплава АМц после комбинированной деформации, включающей РКУП и последующую ГЭ, представлены в таблице 2

Из таблицы видно, что последующая ГЭ после РКУП даже с невысокой степенью деформации приводит к повышению прочностных свойств. Очевидно, что с увеличением разовой степени деформации ГЭ для сплава АМц предел прочности материала существенно повышается (на 19%) по отношению к значениям после деформации 8 РКУП, а твердость HV – на (13%). Пластичность же сохраняется на удовлетворительном уровне: относительное удлинение уменьшается на 5%, а относительное сужение практически не изменяется, что весьма ценно для изготовления всевозможных профилей и деталей для машиностроения. Деформация по указанной комбинированной схеме

позволяет повысить твердость материала по отношению к отожженному состоянию в 1,9 раза.

Таблица 2. Механические свойства сплава АМц после комбинированной пластической деформации.

Обработка	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	HV, МПа
8 РКУП ( $e = 8$ )	218,6	14,1	61	648
8РКУП + ГЭ ( $e = 0,3$ )	230,4	13,9	63	636
8 РКУП + ГЭ ( $e = 0,6$ )	246,2	13,6	61,6	651
8 РКУП + ГЭ ( $e = 0,9$ )	254,2	13,5	60,3	677
8 РКУП + ГЭ ( $e = 1,2$ )	260,7	13,4	60,3	731

Рентгенографический анализ показал, что изменения параметров тонкой структуры, таких как размер блоков мозаики и микронапряжения кристаллической решетки носит весьма неустойчивый характер (таблица 3).

Таблица 3. Структурные параметры сплава АМц в исходном состоянии и после пластической деформации.

Тип обработки	(111) (200) (222) (400)			(111) (222)		(200) (400)	
	a, Å	$D_{\text{HKL}}$ , нм	$\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2} \times 10^{-4}$	$D_{\text{HKL}}$ , нм	$\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2} \times 10^{-4}$	$D_{\text{HKL}}$ , нм	$\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2} \times 10^{-4}$
Отжиг 4000С, 1ч	4,0503(4)	>300	(2,8±0,8)	>300	(2,8±1)	>300	(2,3±1)
8 РКУП ( $e = 8$ )	4,0513(4)	106±4	(4,4±0,5)	258±83	(2,8±1)	102±5	(4,1±0,8)
8РКУП + ГЭ ( $e = 0,3$ )	4,0515(4)	74±2	0	74±2	(6,4±0,6)	67±2	0
8 РКУП + ГЭ ( $e = 0,6$ )	4,0505(3)	>300	(5,3±0,4)	>300	0	102±6	(4,4±1)
8 РКУП + ГЭ ( $e = 0,9$ )	4,0511(7)	131±8	(3,8±0,7)	160±20	(5,1±0,5)	97±4	0
8 РКУП + ГЭ ( $e = 1,2$ )	4,0505(2)	191±30	(7,5±0,5)	236±70	(4,5±0,8)	138±18	(7,5±0,8)

После деформации 8 РКУП величина блоков мозаики, была на уровне  $D_{\text{HKL}}=106$  нм при микронапряжениях  $4,4 \times 10^{-4}$ , а после комбинированной деформации 8 РКУП+ГЭ ( $e=1,2$ ) размер блоков стал больше  $D_{\text{HKL}}=191$  нм, а напряжения кристаллической решетки выросли до  $7,5 \times 10^{-4}$ , это не совсем коррелирует с монотонным увеличением прочностных свойств сплава. Учитывая коллективный характер влияния дисперс-

ности структуры и микронапряжений кристаллической решетки на прочностные свойства, можно предположить, что вероятно основной вклад в упрочнение сплава вносит фаза  $Al_6(Mn,Fe)$  – она является, своего рода, «арматурой» для структуры алюминиевой матрицы, поскольку она более плотная и ее частицы не когерентно связаны с алюминиевой матрицей, т.к. имеют другой тип кристаллической решетки и, согласно литературным данным [10], прочность этой фазы при деформации может увеличиваться до 48%.

#### 4. Заключение

На основании анализа полученных результатов исследования, можно сделать следующие выводы.

В результате пластической деформации по комбинированной схеме обработки, с увеличением разовой степени деформации гидроэкструзией наблюдается монотонное повышение прочностных свойств сплава. При увеличении разовой степени деформации до  $e = 1,2$ , получено значительное упрочнение алюминиевого сплава АМЦ (в 1.9 раз) по отношению к отожженному состоянию материала. Пластичность остается на удовлетворительном уровне: относительное удлинение уменьшается на 5%, а относительное сужение практически не изменяется по отношению к значениям после деформации 8 РКУП, что весьма ценно для изготовления всевозможных профилей и деталей для машиностроения.

Предполагается, что основной вклад в упрочнение вносит фаза  $Al_6(Mn,Fe)$ . Прочность этой фазы при деформации может увеличиваться до 48%.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Р. З. Валиев, А. П. Жилиев, Т. Дж. Лэнгдон. / Объемные наноструктурные материалы: фундаментальные основы применения. Санкт-Петербург, Эко-Вектор, 2017. - 479 с.
2. K. Edalati et al. / Mater. Res. Lett. 2022, Vol 10, No 4, 163-256.
3. K. Edalati. Accepted Manuscript. / Materials Science & Engineering A 2018. Japan.
4. И. Е. Волокитина, А.В. Волокитин. / Физика металлов и металловедение, 2018, 119 (9), с, 971 – 976.
5. С. Н. Лежнев, И. Е. Волокитина, Е. А. Панин, А. В. Волокитин // Физика металлов и металловедение, 2020, 121 (7), с. 757 – 762.
6. А. М. Иванов. / Вестник Брянского государственного технического университета, № 10, 83, с. 19, 2019.
7. А. М. Иванов. // Вестник машиностроения, № 2, с. 81, 2017.
8. Klu E.E., Song D, Li K., Wang G, Cao B., Ma A.B. etc. / Mater. Sci. Eng. A. – 2021. -833. 142371.
9. С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. / М.: МИСИС, 2002. 360 с.
10. В. И. Трефилов, В. Ф. Моисеев, Э. П. Печковский. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов. Под редакцией академика В.И. Трефилова, / Киев, «Наукова думка», 1989. 255 с.

Поступила в редколлегию 09.02.2024