

УДК 669.721.5:620.178.6

Е.Ф. Волкова¹, В.А. Дуюнова¹**ЭФФЕКТ ПРИМЕНЕНИЯ НЕСТАНДАРТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЕФОРМАЦИИ К НЕКОТОРЫМ СЕРИЙНЫМ МАГНИЕВЫМ СПЛАВАМ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-17-23

Подтверждена принципиальная возможность применения обработки давлением методом гидроэкструзии (ГЭ) по отношению к серийным высокопрочным магниевым сплавам МА5 (система Mg–Al–Zn–Mn) и МА14 (система Mg–Zn–Zr). Доказано, что возможно достижение эффекта повышения прочностных свойств этих сплавов на 25–40%. Установлено, что проведение термомеханической обработки (ТМО), включающей промежуточную закалку сплава МА5, перед проведением ГЭ нецелесообразно, поскольку не приводит к улучшению механических свойств. Показано, что выявленные различия в действии ГЭ на окончательный уровень свойств прутков из сплавов МА5 и МА14 связаны с особенностями морфологии упрочняющих фаз и структурой этих сплавов.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии изготовления деформируемых полуфабрикатов и фасонных отливок из магниевых и алюминиевых сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: магниевые сплавы, гидроэкструзия, микроструктура, фазовый состав, механические свойства.

The paper confirms the principal possibility of hydrostatic extrusion (HE) application towards commercial high strength wrought magnesium based alloys MA5 (Mg–Al–Zn–Mn system) and MA14 (Mg–Zn–Zr system). It is proved, that it is possible to reach the strengthening effect of these alloys up to 25–40%. In present study it is stated, that the thermo mechanical processing (TMP) including the intermediate quenching before HE is not expedient because it does not lead to mechanical properties rising. It is proved, that discovered differences in HE influence on final level of MA5 and MA14 alloys properties are connected with peculiarities of strengthening phase morphology and with the structure of the alloys.

The work is executed within implementation of the complex scientific direction 10.10. «Power effective, resource-saving and additive manufacturing techniques of deformable semi-finished products and mold castings from magnesium and aluminum alloys» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: magnesium alloys, hydrostatic extrusion, microstructure, phase composition, mechanical properties.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Интерес к сплавам на основе магния как конструкционному материалу объясняется тем, что они являются наиболее легкими металлическими материалами и обладают хорошими механическими и технологическими свойствами, высокой удельной прочностью и т. п.

Увеличение весовой эффективности сплавов на основе магния остается стратегическим направлением наряду с повышением уровня основных механических характеристик при снижении их анизотропии. В ряде случаев магниевые сплавы могут успешно конкурировать с другими конструкционными материалами, особенно в таких областях, где снижение массы изделий имеет первостепенную значимость.

Достижение величины удельной прочности 16–18 км (усл. ед.) делает эти сплавы реальным конкурентом алюминиевым сплавам [1–4].

Известно, что магниевые сплавы в силу своего кристаллического строения (гексагональная плотноупакованная кристаллическая решетка) могут подвергаться пластической деформации, как правило, только при температурах выше 200–225°C. При этом желательно использовать схему напряженного состояния, гарантирующую минимальное появление в металле значительных растягивающих напряжений, которые ответственны за хрупкое разрушение. Освоенные в серийном производстве технологии деформации предназначены для обработки магниевых сплавов давлением при определенных температурах по

схемам двухстороннего сжатия и растяжения (прокатка, листовая формовка, ковка на гидравлических прессах с малыми степенями обжатия), неравновесного объемного сжатия и одностороннего растяжения (прессование, штамповка в закрытых штампах). Деформация сложнoleгированных высокопрочных магниевых сплавов вызывает определенные трудности. Обычно к ним применяют только схемы неравновесного объемного сжатия и растяжения [5–7].

С этой точки зрения весьма перспективным направлением по отношению к высокопрочным магниевым сплавам может стать использование нестандартной технологии деформации, включающей метод гидроэкструзии (ГЭ).

При гидроэкструзии (гидропрессовании) деформируемое тело находится в условиях все-стороннего равномерного сжатия вследствие воздействия жидкости или квазижидкости, предотвращающей прямой контакт деформируемого материала со стенками контейнера и снижающей силу трения в очаге пластической деформации. Впервые процесс деформации сплавов с применением метода гидропрессования (ГП) был изучен в России [8, 9].

Целью настоящей работы является исследование влияния технологических параметров деформации, включающей метод гидроэкструзии (ГЭ), а также термической обработки на структуру и свойства серийных высокопрочных магниевых сплавов МА5 и МА14.

Материалы и методы

В качестве материала для исследования выбраны высокопрочные сплавы МА5 (система Mg–Al–Zn–Mn) и МА14 (система Mg–Zn–Zr).

В промышленных условиях изготовлены слитки диаметром 370 мм из сплавов МА5 и МА14.

Состав сплавов определен химическим и спектральным методами и соответствует ГОСТ 14957, % (по массе):

- Mg+8,40Al+0,26Mn+0,50Zn (сплав МА5);
- Mg+5,70Zn+0,48Zr (сплав МА14).

Содержание примесей ограничено пределами, установленными ГОСТ 14957, при этом сплав МА5 обладает повышенной чистотой по примесям.

После механической обработки и гомогенизации заготовки диаметром 345 мм отпрессованы на горизонтальном гидравлическом прессе в прутки диаметром 45 мм.

Проведена резка прутков диаметром 45 мм на мерные заготовки и последующая их деформация с применением метода гидроэкструзии на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 1600 тс, оснащенный установкой специальной конструкции.

Режимы термической обработки сплавов выполнены в соответствии с ПИ1.2.655–2003 г.

«Термическая обработка деформируемых магниевых сплавов».

Механические свойства прессованных прутков при одноосном растяжении определены после горячей деформации и в термически обработанном состоянии в соответствии с ГОСТ 1497–84, ГОСТ 25503–80.

Микроструктура сплава исследована на металлографическом комплексе фирмы Leica, съемка изображений проведена при помощи цифровой камеры VEC-335, а также на растровом электронном микроскопе (SEM) и сканирующем микроанализаторе YXA 840 с приставкой Link для микрорентгеноспектрального анализа.

Идентификация фаз проведена методом физико-химического анализа при химическом изолировании фаз с последующим их рентгеноструктурным и химическим анализом изолята по методу порошков на дифрактометре. Съемка изолята и монолитных образцов проводилась в монохроматическом Cu K_{α} -излучении. Интерпретация полученных результатов выполнена при помощи программы Gade, для идентификации фаз использованы возможности компьютерной базы данных с учетом состава сплава. Форму частиц отдельно выделенных фаз дополнительно изучали на электронном микроскопе.

Количественный и качественный микрорентгеноспектральный анализ выполнен на приборе Superprobe-733 [10–13].

Результаты

Свойства деформированных по серийной технологии прессованных прутков диаметром 45 мм в исходном (горячепрессованном) состоянии и после рекомендуемой для каждого сплава термической обработки приведены в табл. 1.

Как следует из анализа данных табл. 1, сплав МА5 в закаленном состоянии демонстрирует максимальный уровень прочностных свойств ($\sigma_b=340\text{--}350$ МПа; $\sigma_{0,2}=242\text{--}258$ МПа). В исходном (горячепрессованном) состоянии в сплаве МА5 наряду с α -твердым раствором присутствуют частицы γ -фазы ($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$), сформированные в направлении, параллельном оси деформации (рис. 1, а).

В процессе старения происходят структурные изменения: частицы упрочняющей γ -фазы выделяются в большом количестве, коагулируют, появляются микрообласти (темное травление), в которых повышена концентрация легирующих элементов, замечен рост зерна. В целом структура носит более грубый характер (размер зерна 14–18 мкм) по сравнению с исходным горячепрессованным состоянием (размер зерна 12–16 мкм) сплава МА5 (рис. 1, б). Наибольший эффект старения отмечается для предела текуче-

Таблица 1

Механические свойства* горячепрессованных прутков диаметром 45 мм из сплавов МА14 и МА5 в различных состояниях (продольное направление)

Сплав	Состояние	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
		МПа		
МА5	Без термообработки (исходное)	$\frac{278-310}{295}$	$\frac{205-220}{216}$	$\frac{10,1-12,0}{11,2}$
	Состаренное (Т1)	$\frac{312-318}{316}$	$\frac{239-254}{247}$	$\frac{5,2-6,3}{5,7}$
	Закаленное (Т4)	$\frac{340-350}{346}$	$\frac{242-258}{251}$	$\frac{4,0-6,4}{5,2}$
МА14	Без термообработки (исходное)	$\frac{295-310}{301}$	$\frac{223-254}{239}$	$\frac{8,6-12,5}{10,3}$
	Состаренное (Т1)	$\frac{328-332}{330}$	$\frac{245-250}{247}$	$\frac{7,8-8,5}{8,2}$
	Закаленное+ +состаренное (Т6)	$\frac{302-315}{307}$	$\frac{210-230}{221}$	$\frac{10,2-14,0}{12,0}$

* В числителе – минимальные и максимальные значения свойств (по результатам испытаний 5–10 образцов), в знаменателе – средние.

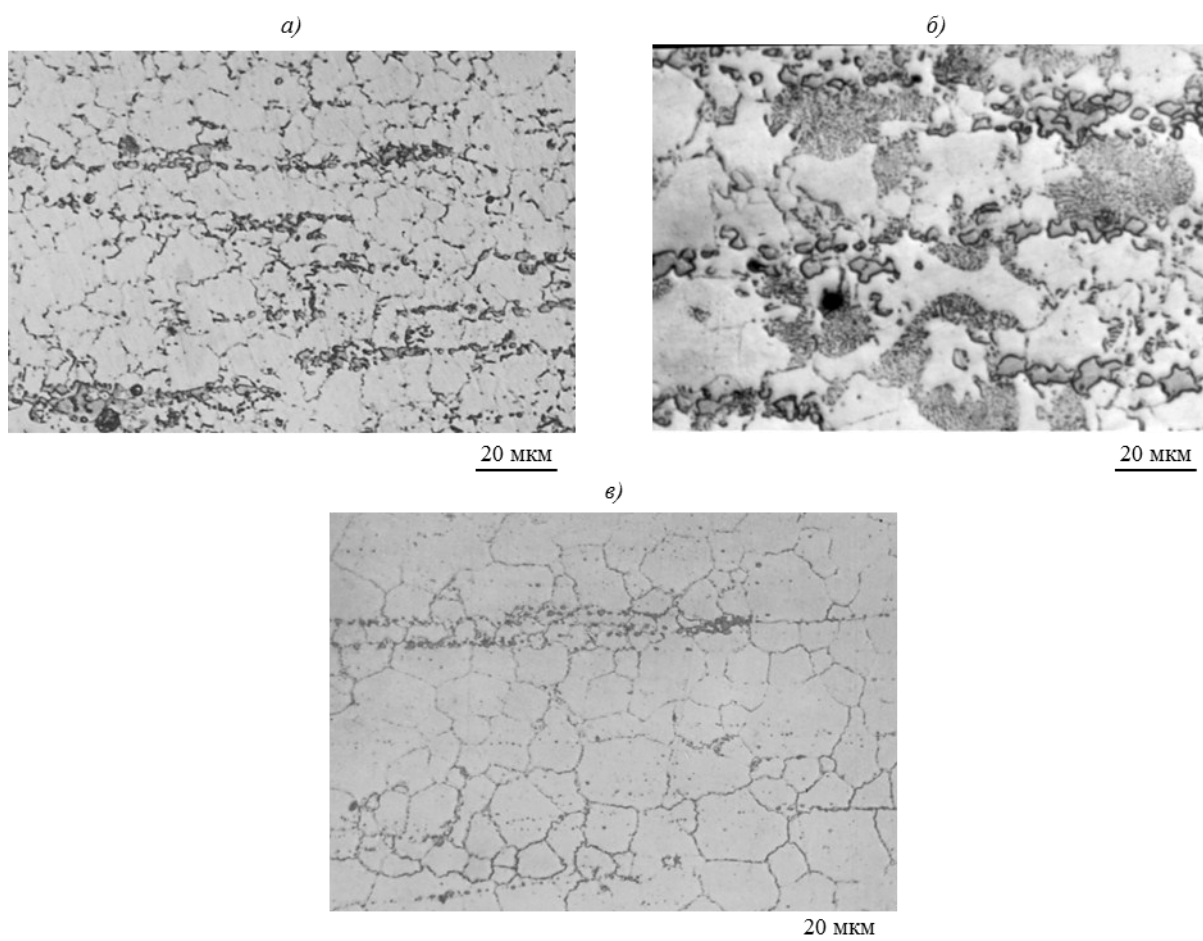


Рис. 1. Микроструктура прутка диаметром 45 мм из сплава МА5 в горячепрессованном состоянии: а – исходное, без термообработки; б – после старения; в – после закалки

сти (~30–35 МПа), одновременно значительно (в ~2 раза) снижается относительное удлинение.

Закалка приводит к практически полному растворению первичных эвтектических составляющих, однако сохраняются строчечные транскристаллитные выделения частиц γ -фазы ($Mg_{17}Al_{12}$). Наряду с этим заметны отдельные высокодисперсные выделения этой фазы внутри объема зерен. Прочностные свойства сплава в закаленном состоянии заметно возрастают (на 40–50 МПа) при снижении более чем в 2 раза относительного удлинения.

Таким образом, наиболее эффективной для сплава МА5 является закалка.

В случае сплава МА14 оптимальное сочетание прочностных и пластических свойств достигается в состаренном состоянии [14].

Эти особенности были учтены при подборе технологического цикла, включающего обработку по методу ГЭ.

При проведении термомеханической обработки (ТМО) для сплава МА5 использован режим закалки.

Диапазон допустимых степеней деформации ограничен для сплава МА5 по верхнему пределу 15–20% ввиду того, что сплав обладает достаточно крупным и неоднородным зерном, имеет определенные структурные особенности [15].

Сплав МА14 отличается более мелким зерном как в исходном горячепрессованном состоянии (размер зерна 7–12 мкм), так и после старения (размер зерна 10–12 мкм) (рис. 2). Кроме того, сплав МА14 обладает хорошим уровнем пластичности ($\delta=8-12\%$).

В связи с этим верхний предел допустимой степени деформации (включая суммарную степень) при использовании ГЭ был повышен для сплава МА14 до 40–45%.

Экспериментально подтверждено, что превышение верхнего предела степени деформации приводит к разрушению заготовок из сплавов МА5 и МА14.

Использована определенная последовательность этапов обработки сплавов: изготовление литой заготовки → прессование прутков диаметром 45 мм по серийной технологии → без или с ТО → ГЭ (одно-двухступенчатая) → без или с ТО.

Как видно из результатов, приведенных в табл. 2, наилучший уровень прочностных свойств прутков из сплава МА5 получен после проведения ГЭ без применения термической обработки.

Сравнение данных, приведенных в табл. 1 и 2, подтверждает, что значения прочностных характеристик горячепрессованного прутка из сплава МА5 возрастают в среднем на 28–30% благодаря проведению обработки по методу ГЭ (15%). В случае применения предварительной закалки (перед проведением ГЭ) прочностные свойства сплава МА5 несколько снижаются (на 7–9 МПа),

а относительное удлинение остается на низком уровне. Это объясняется тем, что закалка сплава МА5 перед обработкой по методу ГЭ приводит к дополнительному росту зерна и некоторому огрублению упрочняющих частиц γ -фазы ($Mg_{17}Al_{12}$). В результате эти особенности наследуются структурой сплава после деформации по методу ГЭ.

Следует также отметить, что особенностью сплава МА5 в случае применения ГЭ наряду со значительным эффектом роста прочностных характеристик является существенное понижение пластичности: величина относительного удлинения снижается с 5,7–12 до 1,7–2,5%.

Перспективные результаты получены на сплаве МА14.

После традиционного прессования предел прочности сплава составляет 310–315 МПа. Проведение одноступенчатой ГЭ со степенью деформации 30% приводит к росту этой характеристики до 375–380 МПа. Соответственно, предел текучести увеличивается с 240–245 до 340 МПа (рис. 3).

Исследовано влияние двухступенчатой ГЭ на свойства горячепрессованных заготовок из сплава МА14 при последовательном возрастании суммарной степени деформации. Анализ диаграммы зависимостей основных механических свойств сплава МА14 от суммарной степени деформации методом ГЭ (рис. 4) показывает, что увеличение этого параметра с 35 до 45% обеспечивает эффект повышения прочностных свойств исходного прессованного прутка на 25–30%: $\sigma_B=390-400$ МПа, $\sigma_{0,2}=350-360$ МПа при величине относительного удлинения ~6,3–8%.

Проведение ГЭ на прутках из сплава МА14 одновременно вызывает механическое дробление более крупных фаз и их частичное растворение и перераспределение. В результате появляются высокодисперсные наноразмерные частицы. Эти частицы, идентифицированные как циркониды цинка – фазы стехиометрического состава $ZrZn_2$, Zn_2Zr_3 , располагаются на плоскостях скольжения и двойниках, что подтверждено предыдущими исследованиями, и хорошо видны при исследовании на сканирующем микроскопе (рис. 5). Высокодисперсные частицы цирконидов цинка размером ~0,05–0,1 мкм в совокупности с искажениями и дефектами, накапливаемыми в кристаллической решетке сплава по мере возрастания степени деформации ГЭ, способствуют значительному повышению свойств [16]. При этом наряду с высокими прочностными характеристиками пластичность сплава МА14 также сохраняется на хорошем уровне (рис. 4).

Обсуждение и заключения

Применительно к серийным высокопрочным магниевым сплавам МА5, МА14 исследовано влияние деформации методом ГЭ на структуру и основные механические свойства, а также уста-

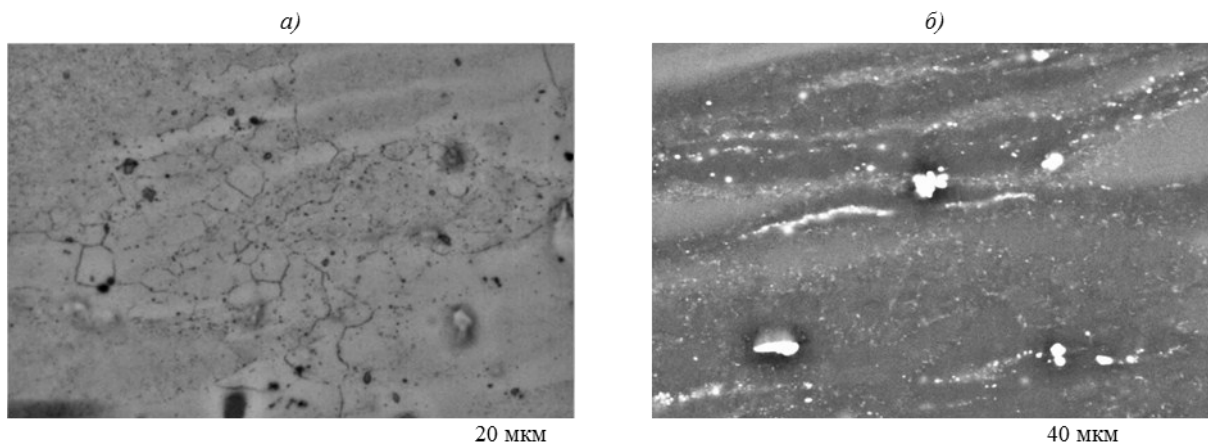


Рис. 2. Микроструктура прутка диаметром 45 мм из сплава МА14 в горячепрессованном состоянии: а – исходное, без термообработки (оптический микроскоп); б – после старения (SEM, сканирующий микроскоп)

Таблица 2

Влияние гидроэкструзии (15%) на механические свойства* горячепрессованного прутка из сплава МА5 (продольное направление)

Состояние	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
	МПа		
Без термообработки (исходное)+ГЭ	$\frac{380-388}{383}$	$\frac{348-358}{354}$	$\frac{1,6-3,2}{2,5}$
Закалка+ГЭ	$\frac{373-377}{375}$	$\frac{343-348}{345}$	$\frac{1,8-2,6}{2,3}$

* В числителе – максимальные и минимальные значения свойств (по результатам испытаний 5–10 образцов), в знаменателе – средние.

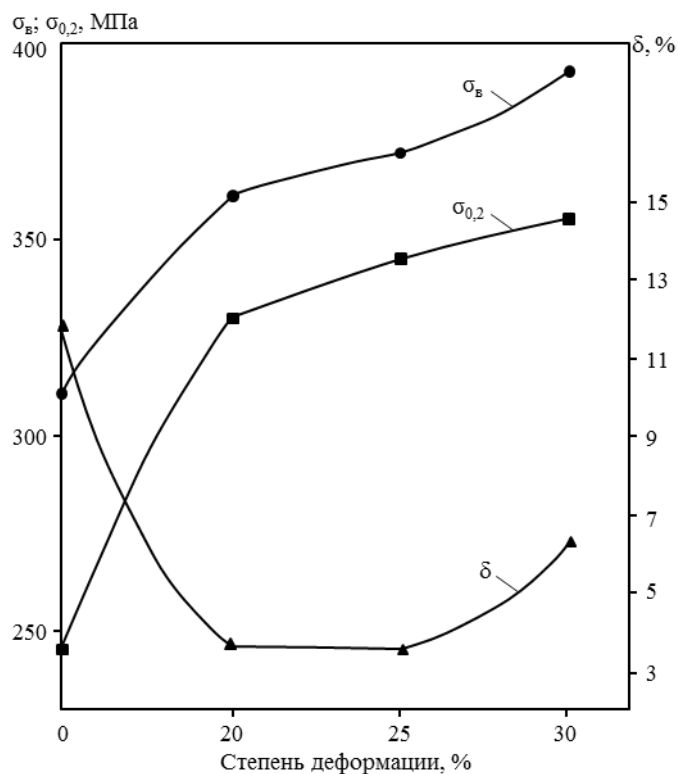


Рис. 3. Механические свойства прутков диаметром 45 мм из сплава МА14 в зависимости от степени деформации (одноступенчатая гидроэкструзия)

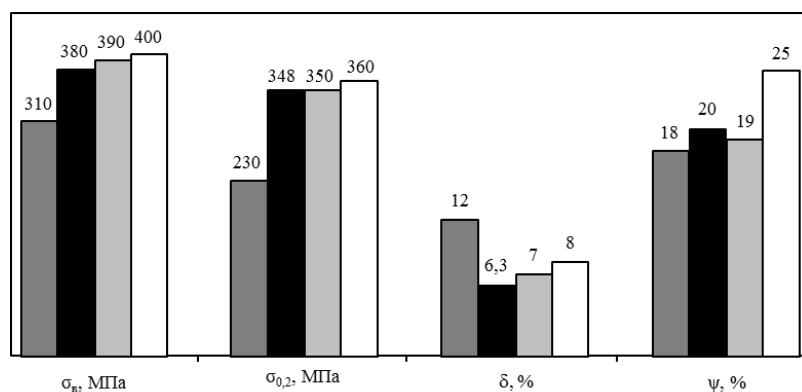


Рис. 4. Изменение механических свойств прутков диаметром 45 мм из сплава МА14 в зависимости от суммарной степени деформации (двухступенчатая гидроэкструзия):

■ – исходные свойства (горячепрессованное состояние); ■ – (15+20)%; ■ – (15+25)%; □ – (15+30)%

а)

б)

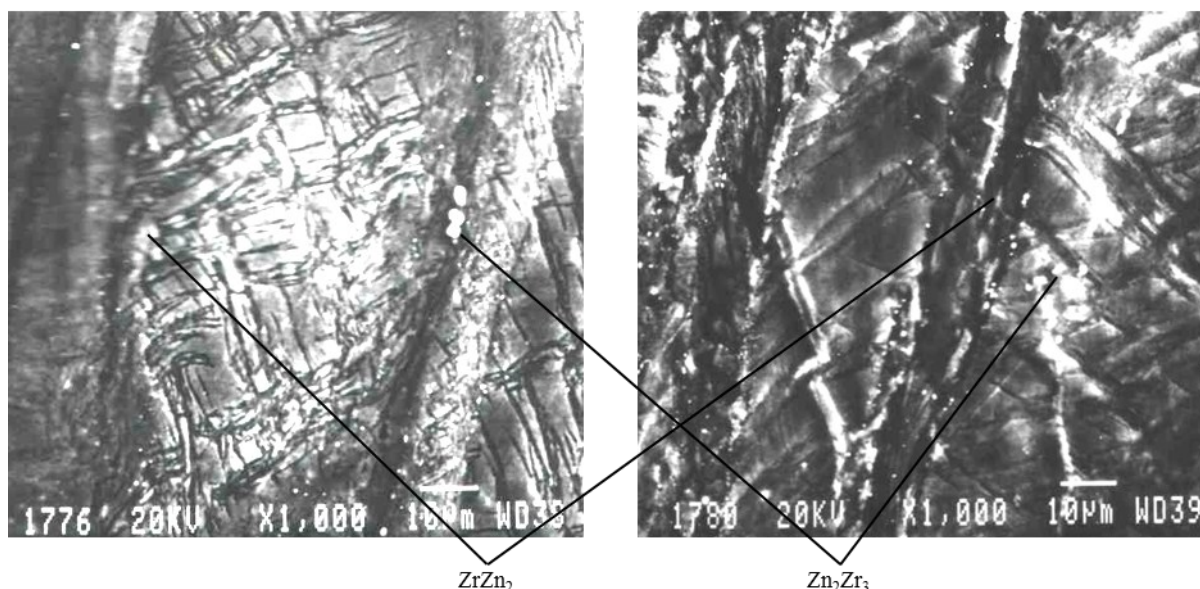


Рис. 5. Микроструктура прутков диаметром 45 мм из сплава МА14 после гидроэкструзии: а – после одноступенчатой ГЭ; б – после ГЭ по двухступенчатому режиму (продольное направление)

новлена принципиальная возможность проведения деформации по методу ГЭ.

Доказано, что оптимальные технологические режимы рассмотренной обработки, включающие применение ГЭ, обеспечивают высокий (на ~25–40%) прирост прочностных свойств серийных магниевых сплавов МА5, МА14.

Сплав МА14 является более восприимчивым к обработке по методу ГЭ, так как демонстрирует не только высокий эффект повышения прочностных свойств, но и хороший уровень пластичности ($\delta \approx 6,3$ –8,0%), а также способность воспринимать двухступенчатую обработку по методу ГЭ.

Для сплава МА5 возможно проведение одноступенчатой ГЭ (со степенью деформации не более 15%), а также ТМО, сочетающей закалку+ГЭ, однако при этом имеет место не только

рост прочностных характеристик, но и значительное снижение характеристики пластичности (до величины $\delta \approx 1,5$ –2,5%).

Различие в воздействии ГЭ на свойства сплавов объясняется особенностями их структуры и фазового состава:

– сплаву МА14 свойственно более мелкое зерно в исходном состоянии ($d=7$ –12 мкм по сравнению с $d=12$ –16 мкм для прутка из сплава МА5); для сплава МА14 характерно достаточно равномерное распределение высокодисперсных частиц упрочняющих интерметаллических фаз – цирконидов цинка ($ZrZn_2$, Zn_2Zr_3);

– сплав МА5 отличается также наличием крупных частиц упрочняющей γ -фазы $Mg_{17}Al_{12}$, ориентированных в направлении, параллельном оси деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Каблов Е.Н. *Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2008. №3. С. 2–14.
3. Корнышева И.С., Волкова Е.Ф., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю. Перспективы применения магниевых и литейных алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 212–222.
4. Николас А., Рольник С. Применение магниевых компонентов в аэрокосмической индустрии // *Аэрокосмический курьер*. 2011. №1. С. 42–44.
5. Волкова Е.Ф. Современные деформируемые сплавы и композиционные материалы на основе магния // *МиТОМ*. 2006. №11. С. 5–9.
6. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.К. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2013. №2. Ст. 01. URL:<http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.05.2015).
7. Оспенникова О.Г., Бубнов М.В., Капитаненко Д.В. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 141–147.
8. Береснев Е.И., Езерский К.И., Трушин Е.В. *Физические основы и практическое применение гидроэкструзии*. М.: Наука, 1981. 239 с.
9. Волкова Е.В., Лебедев В.М., Хрисанова З.Н. Основные направления развития деформируемых магниевых сплавов // *Металловедение, литье и обработка сплавов*. М.: ВИЛС, 1995. С. 108–112.
10. Чабина Е.Б., Алексеев А.А., Филонова Е.В., Лукина Е.А. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2013. №5. Ст. 06. URL:<http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.05.2015).
11. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
12. Волкова Е.Ф., Антипов В.В., Морозова Г.И. Особенности формирования структуры и фазового состава деформированных полуфабрикатов серийного сплава МА14 // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №3. С. 8–15.
13. Volkova E.F. Some Regular Features of Formation of Phase Composition in a Magnesium Alloy of the Mg–Zn–Zr–Y System // *Metal Science and Heat Treatment*. 2014. V. 55. №9–10. P. 477–482.
14. Волкова Е.Ф., Исходжанова И.В., Тарасенко Л.В. Структурные изменения в магниевом сплаве МА14 под воздействием технологических факторов // *МиТОМ*. 2010. №12. С. 19–23.
15. Волкова Е.Ф., Синябрюхов С.Л., Гнеденков С.В., Бецофен С.Я. Влияние деформации и термической обработки на структуру и свойства магниевых сплавов МА5 // *МиТОМ*. 2012. №10. С. 55–59.
16. Volkova E.F. Microstructural & mechanical characterization of magnesium base alloy MA14 (ZK60 A) under deformation & heat treatment // *Proceedings of the 2014 International Conference on High Performance and Optimum Design of Structures and Materials*. 2014. P. 17–25.