

**Андрей Васильевич Парубок<sup>1</sup>\*, Сергей Борисович Сидельников<sup>1</sup>,  
Екатерина Сергеевна Лопатина<sup>1</sup>, Ирина Юрьевна Кокорская<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

\**andrej.parubok@yandex.ru*,

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МАГНИЯ

В данной работе представлены результаты исследования влияния параметров процесса совмещенной прокатки-прессования (СПП) на структуру и свойства прутков из магния Mg90. Определены особенности формирования структуры прутков из магния после деформационного воздействия. Проанализировано изменение их свойств при варьировании скорости деформации при прокатке и вытяжки при прессовании.

*Ключевые слова:* магний, совмещенная прокатка-прессование, механические свойства, структура, моделирование

***Andrey V. Parubok, Sergey B. Sidelnikov, Ekaterina S. Lopatina, Ekaterina Yu. Kokorskaya***

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THERMAL DEFORMATION TREATMENT PARAMETERS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF MAGNESIUM

This paper presents the results of a study of the influence of the parameters of the combined rolling-extrusion process on the structure and properties of Mg90 magnesium rods. The features of the formation of the structure of magnesium rods after deformation are determined. The change in their properties with varying deformation rates during rolling and drawing during pressing is analyzed.

*Keywords:* magnesium, combined rolling-extrusion, mechanical properties, structure, modeling

Магний и его сплавы играют важнейшую роль в различных отраслях промышленности. В аэрокосмической отрасли, они широко используются в производстве критически важных компонентов для самолетов, ракет, космических кораблей и спутников. В автомобилестроении магниевые сплавы применяют для изготовления корпусных деталей, элементов двигателя и трансмиссии [1]. В металлургии магний применяют в качестве раскислителя при производстве чугуна, сталей и цветных сплавов.

Основной проблемой, возникающей в процессе пластической деформации магниевых сплавов, является их малая пластичность, склонность к коррозии и растрескиванию. В связи с этим, для получения качественной продукции необходимо контролировать скоростные и температурные

параметры деформации. В магниевых сплавах процесс пластической деформации обычно проводится в диапазоне температур 250-400 °С и при низких скоростях деформации [2].

Целью данной работы являлось определения влияния деформационных параметров процесса совмещенной прокатки-прессования [3] на структуру и свойства магния марки Мг90.

Для анализа скоростных и температурных условий было проведено моделирование процесса в программном комплексе QForm (рис.1). Моделирование проводилось для процесса прессования прутка диаметром 7 мм, при температуре заготовки 400 °С и разной частоте вращения валков  $\omega$  (4 об/мин и 8 об/мин). В результате моделирования были получены поля распределения температуры и скорости деформации в очаге деформации (см. рис. 1). Из полученных данных видно, что при  $\omega = 4$  об/мин температура в очаге деформации изменяется в пределах 200 °С, тогда как при  $\omega = 8$  об/мин температура увеличивается до 300 °С. Максимальные скорости деформации для  $\omega = 4$  и 8 об/мин локализованы в зоне прессования и составляют 30 и 50 с<sup>-1</sup> соответственно.

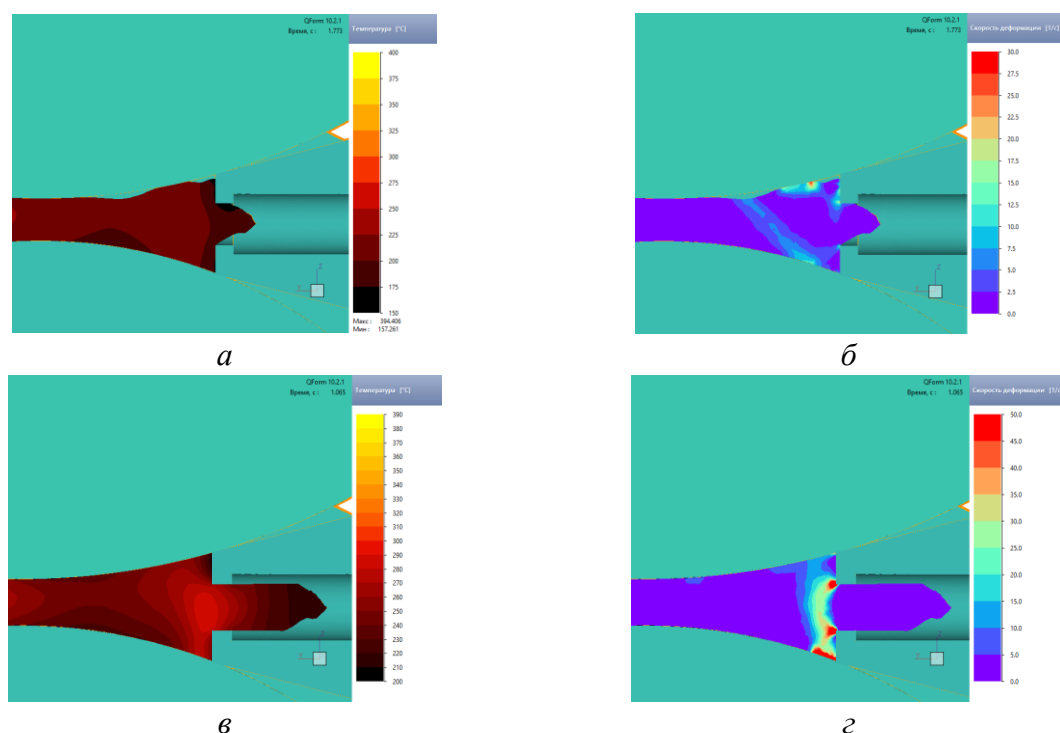
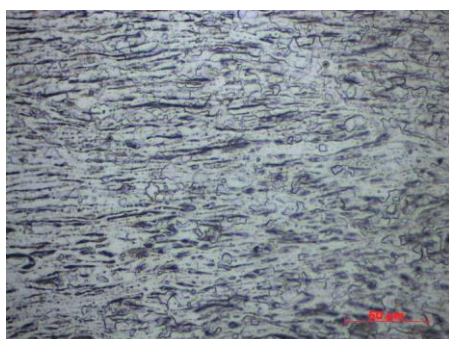


Рис. 1. Поля распределения температуры и скорости деформации в очаге деформации при совмещенной прокатке-прессовании: а, б –  $\omega = 4$  об/мин; в, г – 8 об/мин

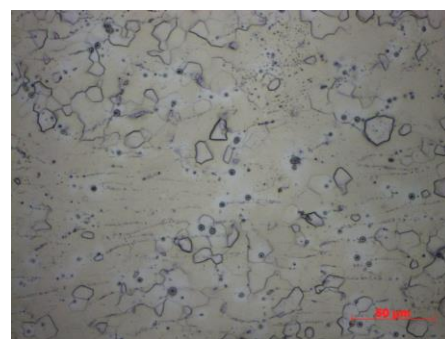
Для экспериментальных исследований на лабораторной установке СПП-200 в качестве заготовок использовали слитки магния Мг90 размерами 14×14 мм и длиной 150 мм. В результате процесса прокатки-прессования получали прутки круглого сечения диаметром 7 мм. Для определения влияния скоростных параметров на структуру и свойства металла заготовки прессовали при частоте вращения валков  $\omega = 4$  и 8 об/мин. Заготовки нагревали до

температуры 400 °С, выдерживали в течении 20 минут для равномерного распределения температуры и затем задавали в валки.

Далее проводили анализ структуры и свойств деформированных прутков, полученных методом совмещенной прокатки прессования. Исследования микроструктуры проводились на микроскопе фирмы CARL ZEISS Axio Observer A1m при увеличении 200, 500 крат. Определение микротвердости производили с помощью цифрового микротвердомера DM8. Металлографический анализ структуры прутков диаметром 7 мм, полученных методом СПП при  $\omega = 4$  и 8 об/мин из слитка магния Mg90, показал, что для обработки при  $\omega = 4$  об/мин характерно волокнистое строение (рис. 2). На ее фоне выявляются мелкие рекристаллизованные зерна размером 10-15 мкм (рис. 2, а). Нагрев литой заготовки под деформацию составляет 400 °С, что значительно больше температуры рекристаллизации магния [4], поэтому во время деформации металла протекают рекристаллизационные процессы. Таким образом, в прутках, полученных по технологии СПП при  $\omega = 4$  об/мин сформировалась структура, характерная для начальных процессов рекристаллизации. При частоте вращения валков  $\omega = 8$  об/мин структура прутка состоит из мелких рекристаллизованных зерен, размер которых составляет в среднем 25-30 мкм (рис. 2, б). Структура по сечению образца не однородна. Большую его часть занимают области с рекристаллизованной структурой, а также наблюдаются зоны, где сохранилось волокнистое строение.



а



б

Рис. 2. Микроструктура прутка из магния марки Mg90 диаметром 7 мм, полученного методом СПП: при а –  $\omega = 4$  об/мин; б –  $\omega = 8$  об/мин,  $\times 500$

Проведение лабораторных исследований позволило рекомендовать технологию получения прутков из магния диаметром 5 и 9 мм методом СПП в промышленных условиях. Они были проведены на опытно-промышленной установке СПП-400 Красноярского завода современных материалов. Металлографический анализ структуры этих прутков показал, что их микроструктура идентична и характеризуется зерненным строением (рис. 3). Форма и размер зерен в структуре прутков характерны для собирательной рекристаллизации, при которых формируются прямолинейные границы тройных стыков зерен под углом 120°, образуя зерна в виде шестигранников. В некоторых зернах можно наблюдать скопление двойников линзообразной

формы. Это связано с тем, что магний склонен к двойникованию на начальных стадиях деформации, а также двойниковые границы могут быть неотъемлемой частью литой структуры магния [5]. Наличие двойников характерно для структуры всех исследуемых образцов, полученных по различным деформационным параметрам. На образцах из прутков, полученных на установке СПП-400, из-за достаточно крупнозернистого строения, двойники более ярко выражены.

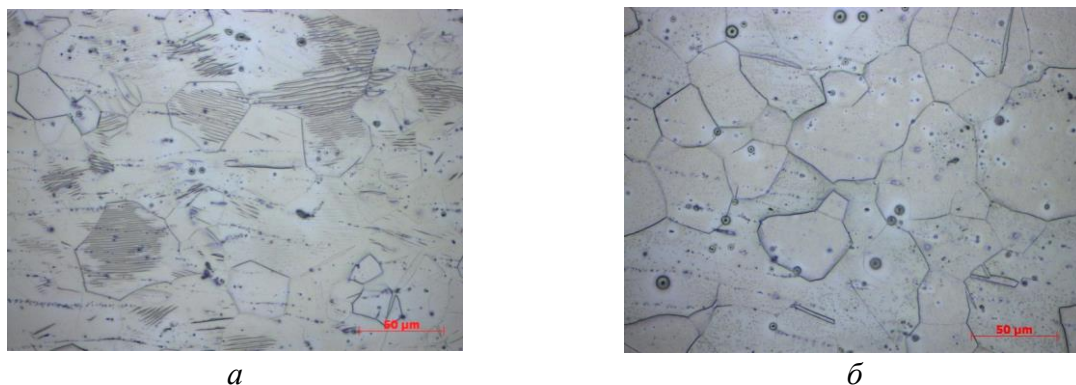


Рис. 3. Микроструктура прутка из магния марки Мг90, полученного методом СПП-400: *а* – диаметр 9 мм, *б* – диаметр 5 мм,  $\times 500$ ;

Анализ механических свойств прутков (табл. 1) показал, что характеристики прочности прутков из магния, полученные на установке СПП-200 составляют 150-158 МПа. Для прутков, полученных на установке СПП-400, прочностные свойства при максимальной вытяжке могут достигать 215 МПа. Пластичность исследуемых прутков не зависимо от типа установки достаточно низкая и составляет 2 - 4 %. Значения микротвердости прутков также существенно не изменяются и составляют 22 - 30 кгс/мм<sup>2</sup>.

Таблица 1

Механические свойства прутков, полученных методом СПП из магния марки Мг90 при температуре нагрева заготовки 400° С

Вытяжка при прессовании	Частота вращения валков, об/мин	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ , МПа	Временное сопротивление, $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta$ , %	Микротвердость HV, кгс/мм <sup>2</sup>
Установка СПП-200					
6,6	4	94	150	4	28±1,6
6,6	8	82	158	4	22±1,1
Установка СПП-400					
9,7	2,4	75	96	4	26±0,7
31,4	2,4	89	215	2	30±0,7

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

-метод совмещенной прокатки-прессования дает возможность получения из литых заготовок магния прутков диаметром 5-9 мм;

-в лабораторных условиях увеличение частоты вращения валков с  $\omega = 4$  до 8 об/мин при одинаковой вытяжке привело к повышению скорости деформации и температуры в очаге деформации, в таких условиях процессы рекристаллизации начинаются при более низких температурах и рекристаллизованные зерна практически полностью заменяют волокнистое строение в микроструктуре прутка;

-в прутках, полученных в промышленных условиях при одинаковой скорости вращения валков и разной вытяжке при прессовании, в структуре протекают процессы собирательной рекристаллизации, что является следствием более высокой температуры в очаге деформации;

-в зависимости от вытяжки при прессовании возможно получение прутков с характеристиками прочности от 96 до 215 МПа;

-изменение деформационных параметров не оказало существенного влияния на пластические свойства прутков из магния, которые были невелики.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Research advances of magnesium and magnesium alloys globally in 2023 / J. She et al. // Journal of Magnesium and Alloys. – 2024.
2. Welding materials for magnesium alloys / L. Liu // Welding and Joining of Magnesium Alloys. – Woodhead Publishing, 2010. – P. 23-37.
3. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Н.Н. Загиров - М.: МАКС Пресс, 2005. 344 с.
4. Магниевоы сплавы. Справочник Ч1. Металловедение магния и его сплавов. Области применения. М. Металлургия, 1978. – 232 с.
5. Кругликов Н.А. Микроструктура и механические свойства литого магния / Н.А. Кругликов, Ю.Н. Логинов, Б.И. Каменецкий [и др.] // Литейщик России. –2013. –№8. – С. 17-21.

#### REFERENCES

1. She J. Research advances of magnesium and magnesium alloys globally in 2023 / J. She et al. // Journal of Magnesium and Alloys. – 2024.
2. Liu L. Welding materials for magnesium alloys // Welding and Joining of Magnesium Alloys. – Woodhead Publishing, 2010. – P. 23-37.
3. Sidelnikov S.B. Combined and joint methods of processing non-ferrous metals and alloys / S.B. Sidelnikov, N.N. Dovzhenko, N.N. Zagirov - M.: MAKSS Press, 2005. 344 p. (in Russian)
4. Magnesium Alloys. Handbook. Part 1. Metallurgy of magnesium and its alloys. Areas of application. Moscow. Metallurgy, 1978. - 232 p. (in Russian)

5. Kruglikov N.A. Microstructure and mechanical properties of cast magnesium / N.A. Kruglikov, Y.N. Loginov, B.I. Kamenetsky et al. // Liteishchik Rossii. – 2013. – V. 8. – P. 17-21. (in Russian)