

УДК 669.7

Структура и механические свойства прессованных прутков сплава системы Al–Zn–Mg–Ni–Fe, полученного литьем в электромагнитный кристаллизатор

Белов Николай Александрович¹

nikolay-belov@yandex.ru

SPIN-код: 1300-2529

Черкасов Станислав Олегович¹

ch3rkasov@gmail.com

Мотков Михаил Михайлович²

mikhail145@mail.ru

¹ НИТУ МИСИС, Москва, Россия² СФУ, Красноярск, Россия

Аннотация. С применением расчетных и экспериментальных методов проведено исследование структуры и механических свойств алюминиевого сплава Al–7,4%Zn–2,8%Mg–1,3%Ni–0,9%Fe–0,2%Zr–0,1%Sc (масс. %), полученного методом литья в электромагнитный кристаллизатор в виде литой прутковой заготовки диаметром 12 мм. В процессе деформационно-термической обработки, включающей прессование методом Конформ, формируется структура композиционного типа, в которой глобулярные частицы фазы Al₉FeNi субмикронного размера равномерно распределены в алюминиевой матрице. Термическая обработка прессованных прутков, включающая закалку и старение, позволяет достигнуть высоких прочностных свойств за счет формирования наноразмерных вторичных выделений, содержащих магний и цинк.

Ключевые слова: деформируемые алюминиевые сплавы, электромагнитный кристаллизатор, прессование, фазовый состав, структура, механические свойства

Structure and mechanical properties of extruded bars of the Al–Zn–Mg–Ni–Fe alloy manufactured by electromagnetic casting

Belov Nikolay Alexandovich¹

nikolay-belov@yandex.ru

SPIN-code: 1300-2529

Cherkasov Stanislav Olegovich¹

ch3rkasov@gmail.com

Motkov Mikhail Mikhailovich²

mikhail145@mail.ru

¹ NUST MISIS, Moscow, Russia² SFU, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. Using calculation and experimental methods, the structure and mechanical properties of aluminum alloy Al–7.4%Zn–2.8%Mg–1.3%Ni–0.9%Fe–0.2%Zr–0.1%Sc (wt. %) manufactured by electromagnetic casting in the form of a cast bar blank with a diameter of 12 mm were carried out. In the process of deformation-heat treatment, including extrusion by the Conform method, a composite-type structure is formed, in which globular particles of the Al₉FeNi phase of submicron size are evenly distributed in an aluminum matrix. Heat treatment of extruded bars, including quenching and aging, makes it possible to achieve

high strength properties due to the formation of nano-sized precipitates containing magnesium and zinc.

Keywords: wrought aluminum alloys, electromagnetic crystallizer, extrusion, phase composition, structure, mechanical properties

Введение. В исследовательских работах, проводимых в 1970–1990-х гг. под руководством В.И. Добаткина в ВИЛС, были разработаны новые композиции сплавов на основе системы Al–Zn–Mg–Cu. Эти сплавы, легированные никелем, кобальтом и железом, ориентировались на применение технологии быстрого затвердевания (RS) с последующей порошковой металлургией (PM) [1]. Несмотря на то, что прочностные свойства таких сплавов существенно превосходили аналогичные показатели для марочных сплавов, внедрение этой технологии оказалось затруднительным из-за ее высокой стоимости и сложности производственного процесса. Ограниченная доступность и высокая цена полуфабрикатов стали основными факторами, препятствующими ее массовому распространению. «НПЦ Магнитной гидродинамики» предложила альтернативу технологии RS/PM, разработав и запустив опытно-промышленное оборудование для производства алюминиевых сплавов методом литья в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК) [2, 3]. Результаты исследования позволяют заключить, что метод ЭМК представляет собой перспективный подход для создания высокопрочных алюминиевых сплавов 7-й группы [4, 5] с повышенным содержанием железа.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования выступил экспериментальный сплав Al–7.4%Zn–2.8%Mg–1.3%Ni–0.9%Fe–0.2%Zr–0.1%Sc, основой композиции которого выступил марочный сплав AZ6NF [4]. Состав был выбран по верхнему пределу концентраций основных элементов (цинка и магния), концентрация железа и никеля была повышена в 2 раза, кроме того, была введена добавка скандия в количестве 0,1 %. Экспериментальный сплав был получен в виде прутковой заготовки диаметром 12 мм (рис. 1, а) в производственных условиях ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» с использованием метода литья в ЭМК.

Для производства прутков применялся метод КОНФОРМ, который позволял прессовать заготовки диаметром 3,7 мм (рис. 1, б) на базе производственных мощностей ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики».



Рис. 1. Фрагменты ЭМК заготовки (а) и полученного из нее прессованного прутка (б)

Микроструктурные изменения образцов на каждом этапе ДТО анализировались при помощи сканирующей электронной микроскопии с использова-

нием микроскопа TESCAN VEGA 3. Для оценки прочностных характеристик прессованных прутков (временного сопротивления на разрыв, предела текучести и относительного удлинения) использовался метод испытания на растяжение. Испытания проводились на универсальной разрывной машине Zwick/Z 250 при скорости растяжения 5 мм/мин. Длина расчетного участка образцов составляла 100 мм.

Результаты. Исходная литая структура ЭМК-заготовки представляет собой доэвтектическую микроструктуру, отличающуюся высокой однородностью и малым размером дендритных ячеек алюминиевой фазы (Al) с диаметром около 5 мкм (рис. 2, а). По границам этих ячеек сосредоточены включения фаз, обогащенных такими элементами, как железо, никель, цинк и магний. Размер таких включений составляет 1–2 мкм. При этом железо и никель практически не растворяются в матрице (Al), тогда как растворимость цинка и магния достигает примерно половины их содержания в сплаве. Добавки циркония и скандия полностью переходят в матрицу (Al). Согласно расчетным данным, в равновесных условиях кристаллизация сплава AZ7 должна начинаться с образования фазы Al_9FeNi . Однако из-за высокой скорости охлаждения, характерной для метода ЭМК, расширяется диапазон первичной кристаллизации алюминиевой фазы (Al), и поэтому фаза Al_9FeNi формируется только в процессе эвтектической реакции: $L \rightarrow (\text{Al}) + \text{Al}_9\text{FeNi}$. Модель Шейля – Гулливера также подтверждает, что фаза $T(\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3)$, обогащенная цинком и магнием, образуется при неравновесной кристаллизации при температуре 480 °С, что соответствует наблюдаемой литой структуре (рис. 2, а). Это означает, что даже при сверхвысокой скорости охлаждения при литье в ЭМК-пресс, формирование фазы Т избежать невозможно.

Микроструктурный анализ отожженного ЭМК-прессованного прутка показывает, что нагрев до 450 °С в течение трех часов обеспечивает полное растворение Zn и Mg в матрице (Al). При этом морфология эвтектических включений фазы Al_9FeNi остается практически неизменной.

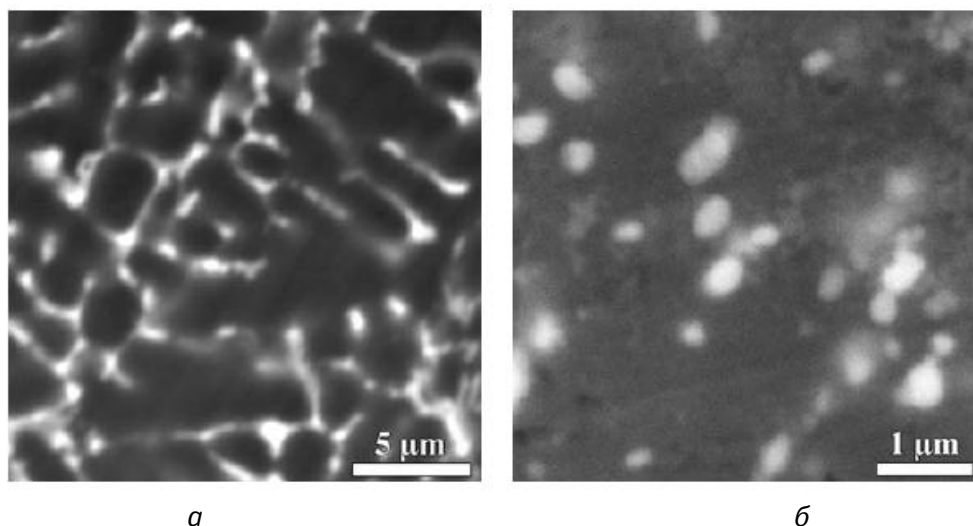


Рис. 2. Структура сплава ZF в литой ЭМК заготовке (а) и прессованном прутке (б), СЭМ

После подбора параметров процесса были получены бездефектные прутки диаметром 3,7 мм (степень обжатия ~90 %) (рис. 1, б). Изучение структуры прессованных прутков показало высокую однородность распределения частиц Al_9FeNi , как в поперечном (рис. 6, а), так и в продольном (рис. 6, б) направлениях. При этом их размер не превышает ~0,5 мкм (рис. 2, б). Такая структура позволила получить высокие механические свойства после термообработки по режимам Т (закалка и естественное старение) Т1 (закалка и старение на максимальную прочность) (табл. 1).

Таблица 1

Механические свойства прессованных прутков сплава AZ7

Термообработка	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Т	650	523	8,3
Т1	666	632	3,8

Обсуждение полученных результатов. При выборе режима отжига литой ЭМК-заготовки учитывалась необходимость сочетания двух процессов: формирование наночастиц дисперсоидов $\text{Al}_3(\text{Zr}, \text{Sc})$ с кристаллической решеткой L_{12} и полное растворение эвтектических включений фазы Т в (Al). Согласно литературным данным [6], оптимальная температура для достижения этих целей при содержании Zr и Sc, аналогичном используемому в данном сплаве, составляет 450 °С. Именно при этой температуре обеспечивается минимальный размер дисперсоидов, что позволяет сохранить их наноразмерный масштаб. Кроме того, такая температура достаточна для полного растворения цинка и магния в алюминиевой матрице, что подтверждают расчеты (табл. 2).

Таблица 2

Расчетные параметры фазового состава экспериментального сплава ZF

Т, °С	Доля фаз, масс. %				Концентрация в (Al), масс. %			
	Al_9FeNi	T(Al,Mg,Zn)	$\text{Al}_3(\text{Zr}, \text{Sc})$	(Al)	Zn	Mg	Zr	Sc
450	6,84	0	0,56	92,60	7,99	3,02	0,04	0,01
150	6,85	10,46	0,65	82,04	0,75	0,64	<0,01	<0,01

Суммируя полученные результаты на полосах, можно заключить, что комбинация высокой твердости и пластичности при деформации открывает возможности для достижения выдающихся механических характеристик. Это подтверждает перспективность применения технологии ЭМК к сплавам типа AZ6NF с повышенным содержанием железа.

Заключение. Расчетными (Thermo-Calc) и экспериментальными (СЭМ, МРСА, ПЭМ) методами была проведена комплексная оценка структурных

изменений сплава Al-7,4%Zn-2,8%Mg-1,3%Ni-0,9%Fe -0,2%Zr-0,1%Sc), полученного методом литья в электромагнитный кристаллизатор, в процессе деформационно-термической обработки. Высокая степень однородности структуры ЭМК-заготовок обеспечивает материалу значительную пластичность при деформации, что позволяет изготавливать различные длинномерные полуфабрикаты. В ходе деформационной обработки формируется структура, напоминающая композитную: глобулярные частицы фазы Al_9FeNi субмикронного размера с равномерным распределением в алюминиевой матрице.

Список источников

- [1] Добаткин В.И., Елагин В.И., Федоров В.М. *Быстрозакристаллизованные алюминиевые сплавы*. Москва, ВИЛС, 1995, 341 с.
- [2] Авдулов А.А., Усынина Г.П., Сергеев Н.В., Гудков И.С. Отличительные особенности структуры и свойств длинномерных слитков малого сечения из алюминиевых сплавов, отлитых в электромагнитный кристаллизатор. *Цветные металлы*, 2017, № 7, с. 73–77.
- [3] Короткова Н.О., Белов Н.А., Тимофеев В.Н., Мотков М.М., Черкасов С.О. Влияние режима термической обработки на структуру и свойства проводникового алюминиевого сплава Al-7% РЗМ, полученного литьем в электромагнитном кристаллизаторе. *Физика металлов и металловедение*, 2020, т. 121, № 2, с. 200–206.
- [4] ГОСТ 4784–2019. *Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки*. Москва, Стандартинформ, 2019, 34 с.
- [5] Белов Н.А., Тимофеев В.Н., Черкасов С.О., Мотков М.М., Мусин А.Ф. Влияние деформационно-термической обработки на структуру и упрочнение сплава Al-7.1%Zn-2.8%Mg-1.4%Ni-1.1%Fe, полученного методом литья в электромагнитный кристаллизатор. *Физика металлов и металловедение*, 2023, т. 124, № 4, с. 436–443.
- [6] Белов Н.А. *Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов*. Москва, Издательский Дом МИСиС, 2010, 511 с.