

Влияние всесторонней изотермическойковки и криогенной прокатки на структуру и механические свойства алюминиевого сплава 1570с

Р.Р. Загитов, О.Ш. Ситдииков, Е.В. Автократова, С.В. Крымский,
В.В. Терешкин, О.Э. Латыпова, М.В. Маркушев

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия

Среди термически неупрочняемых алюминиевых сплавов сплав 1570С (Al-5,0Mg-0,18Mn-0,2Sc-0,08Zr-0,01Fe-0,01Si, вес. %) является одним из наиболее прочных, и одновременно обладающих высокой коррозионной стойкостью и хорошей свариваемостью. Однако низкая технологическая пластичность затрудняет широкое его промышленное использование, особенно для изготовления изделий холодной штамповкой и прокаткой. Предыдущие исследования авторов [1] показали, что интенсивная пластическая деформация сплава, приводящая к измельчению зерен до ультрамелких размеров, способствует повышению его пластичности при температурах близких к комнатной, и одновременному улучшению комплекса механических свойств, регистрируемых в условиях статического и динамического нагружений.

Цель работы - оценить потенциал деформации ультрамелкозернистого сплава в условиях пониженных (криогенных) температур и возможность получения листовых полуфабрикатов с уникальными служебными свойствами.

Слиток сплава был гомогенизирован при 360°C в течение 6 часов и подвергнут всесторонней изотермической ковке (ВИК) при температуре 325°C с истинной степенью деформации $\epsilon=12$, а также последующей криопробатке при температуре жидкого азота (-196°C) со степенями обжатия до 90%. Качественный и количественный анализ структуры сплава проводили с использованием стандартных методов оптической металлографии, растровой электронной микроскопии, включая EBSD-анализ, просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и рентгеноструктурного анализа. Параметры статической прочности определяли по результатам растяжения при комнатной температуре образцов с размерами рабочей части 3 мм на машине Instron 598.

Гомогенизированный слиток имел крупнозернистую структуру со средним размером зерна около 25 мкм, в которой были равномерно распределены дисперсоиды - когерентные выделения $Al_3(Sc,Zr)$ размером около 20 нм. Проведение ВИК привело к формированию достаточно однородной (ультра)мелкозернистой структуры, с объемными долями (ультра)мелких зерен около 80% и высокоугловых границ почти 85%, а также с размерами зерна и субзерна около 2,3 и 1,9 мкм, соответственно (рис.1). Кроме того, плотность дислокаций в такой структуре составила $5 \times 10^{12} \text{ м}^{-2}$, а размер областей когерентного рассеяния - 0,7 мкм. При этом, как и в гомогенизованном слитке, дисперсоиды преимущественно были когерентны матрице и равномерно распределены по объему материала.

Сплав после ВИК показал повышенную трещиностойкость, что позволило успешно его прокатать без образования трещин в криогенных изотермических условиях практически до 90%. Повышенной прокатываемости, прежде всего, способствовало измельчение зерен при ковке, а также измельчение дроблением/фрагментацией и пространственное перераспределение избыточных фаз. Одновременно с формированием «новых» межкристаллитных границ отмечали выравнивание состава твердого раствора по магнию, особенно в приграничных областях «старых» границ.

Криопробатка привела к формированию сильнодеформированной структуры, которая характеризовалась плотностью дислокаций до 10^{15} м^{-2} и размером областей когерентного рассеяния около 15 нм. При этом она оставалась (ультра)мелкозернистой (рис. 2), несмотря на увеличение долевого размера зерна в плоскости прокатки до 3,5 мкм и на порядок уменьшения их толщины. Последнее было вызвано изменением формы зерен - их «раскатыванием в блин» при прокатке. Основными процессами, ответственными за структурные изменения, были фрагментация зерен и полигонизация, приводившие к уменьшению доли высокоугловых границ до 30% и размера субзерна до 0,3 мкм.

Механические свойства сплава приведены в таблице 1. По полученным данным видно, что ВИК не привела к значительному изменению прочностных свойств сплава, но при этом наблюдалось значительное увеличение значение относительного удлинения. Слабое изменение прочностных свойств при ВИК связано с ростом частиц и дисперсоидов, которое вело к снижению твердорастворного твердения, что нивелировало эффект измельчения зерна. Повышение значения относительного удлинения происходило из-за образования в сплаве ультрамелкозернистой структуры с измельченными и более однородно распределенными в матрице

частицами избыточных фаз, а также дисперсоидами. В свою очередь образование такой структуры позволило прокатывать сплав при комнатной и криогенной температурах. Криопротатка привела к двукратному увеличению прочностных параметров за счет формирования в зернах субструктуры с высокой плотностью дислокаций. Хотя сильное упрочнение сплава сопровождалось снижением пластичности в четыре раза, но абсолютный уровень удлинений остался высоким, причем существенно выше, чем в термоупрочняемых высокопрочных сплавах типа В96ц.

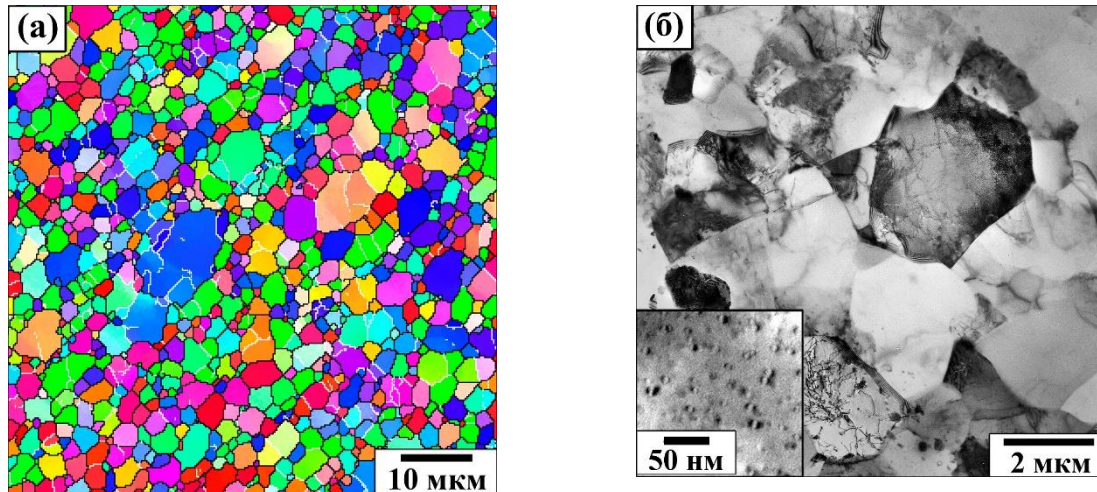


Рис. 1. Микроструктура сплава после ВИК: (а) EBSD, (б) ПЭМ.

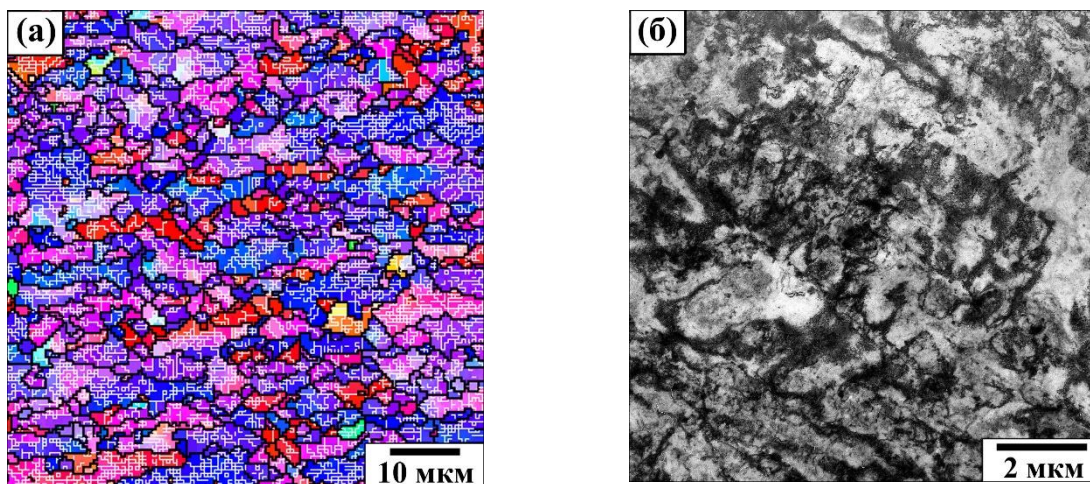


Рис. 2. Микроструктура сплава после криогенной прокатки с обжатием 90%: (а) EBSD, (б) ПЭМ.

Таблица 1 – Механические свойства сплавов

Состояние	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	Источник
Гомогенизированный слиток	245 ± 10	355 ± 10	26 ± 2	[1]
ВИК	235 ± 5	365 ± 5	37 ± 2	
ВИК + прокатка при -196°C , 90%	590 ± 5	620 ± 5	9 ± 1	-
В96цТ1 (штамповка толщиной до 50 мм)	600	640	5	[2]

Как результат, сплава 1570С демонстрировал уникальный баланс параметров статической прочности - пределы текучести и прочности около 590 и 620 МПа соответственно, при пластичности около 9%.

Сделан вывод о том, что термомеханическая обработка, основанная на сочетании всесторонней изотермической ковки при высоких температурах и последующей криопрокатки, является высокоэффективным методом получения (ультра)мелкозернистых листов из термически неупрочняемых Al-Mg сплавов типа 1570 с уникальными механическими свойствами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00702 <https://rscf.ru/project/23-19-00702>. Работы проводились на базе Центра коллективного пользования ИМСП РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов».

Список литературы

- [1] Avtokratova E. The processing route towards outstanding performance of the severely deformed Al–Mg–Mn–Sc–Zr alloy / E. Avtokratova, O. Sitdikov, M. Markushev, M. Linderov, D. Merson, A. Vinogradov – DOI 10.1016/j.msea.2021.140818 // Mater. Sci. Eng. A – 2021. – Vol. 806, 140818.
- [2] Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение) справочник / В. М. Белецкий, Г. А. Кривов ; под общ. ред. И. Н. Фридляндера // Киев : Коминтех, 2005. – 365 с.