

**СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1570С
ПОСЛЕ ВСЕСТОРОННЕЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ КОВКИ**

Ситдиков О.Ш., Автокротова Е.В., Ильясов Р.Р., Латыпова О.Э., Маркушев М.В.
Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа, Россия
sitdikov@nm.ru

Термонеупрочняемый сплав 1570С (Al-5Mg-0,18Mn-0,2Sc-0,08Zr, вес.%), является одним из перспективных конструкционных материалов авиакосмической техники нового поколения. Он легко обрабатывается давлением при повышенных температурах, в (ультра)мелкозернистом (УМЗ) состоянии демонстрирует уникальные сверхпластические свойства [1,2]. Одним из критичных вопросов промышленного использования сплава является отсутствие эффективного технологического процесса получения массивных предзаготовок с УМЗ структурой.

Цель работы - исследовать структуру и механические свойства слитков сплава подвергнутых всесторонней изотермической ковке (ВИК).

Заготовки $\varnothing 80 \times 150$ мм, вырезанные из гомогенизированного при 360°C в течение 6 часов слитка, последовательно осаживали и протягивали при температуре 325°C ($\sim 0,65T_{\text{пл}}$) до суммарной степени деформации $\epsilon \approx 12$ по схеме, представленной на рисунке 1 [3]. Форма и размеры заготовки при этом сохранялись приблизительно постоянными после каждого перехода. Для фиксации структурных изменений, вызванных деформацией, заготовку после ВИК охлаждали в воде. Структуру деформированного сплава исследовали в центральной части заготовок (в поперечном сечении, параллельном последней оси сжатия), применяя стандартные методы оптической металлографии (ОМ) (с использованием микроскопа «Nikon L-150»), а также сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии (СЭМ и ПЭМ) (с использованием микроскопов «TESCAN MIRA 3 LMH SEM» с приставкой HKL Channel 5 и «JEOL-2000EX», соответственно). Угловые и размерные параметры структуры, в том числе, средний угол разориентировки межкристаллитных границ, долю большеугловых границ, и средний размер зерен и субзерен определяли из анализа картин дифракции обратно рассеянных электронов (СЭМ-EBSD). Размер (суб)зерен определяли методом эквивалентного диаметра, как величину диаметра круга, равновеликого эллипсу, вписанному в кристаллит. Микротвердость измеряли по методу Виккерса при комнатной температуре при нагрузке 0.5 Н. Испытания на растяжение плоских образцов с размером рабочей части $1,5 \times 3 \times 6$ мм проводили при комнатной и повышенных температурах на универсальном динамометре «Instron 1185». Термическую стабильность структуры оценивали после часового отжига в интервале температур $325-500^\circ\text{C}$.

В исходном литом и гомогенизированном состоянии сплав имел равноосную зеренную структуру с размером зерна ~ 25 мкм (рис. 2 а) и содержал относительно равномерно распределенные наноразмерные ($\sim 5-10$ нм в диаметре) когерентные выделения $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$. В результате ВИК в заготовках была получена достаточно однородная равноосная УМЗ структура (рис. 2 б-г), формирование которой было обусловлено многоэтапностью и разнонаправленностью деформации, обеспечившей равномерность измельчения зерен по объему заготовки. Доля большеугловых границ и средний угол разориентировки межкристаллитных границ в такой структуре составили $0,78$ и $31,4^\circ$, соответственно, при размере мелких зерен около 2 мкм.

Механические свойства сплава при комнатной температуре в состояниях до и после ВИК представлены в таблице 1. Для сравнения там же приведены данные для

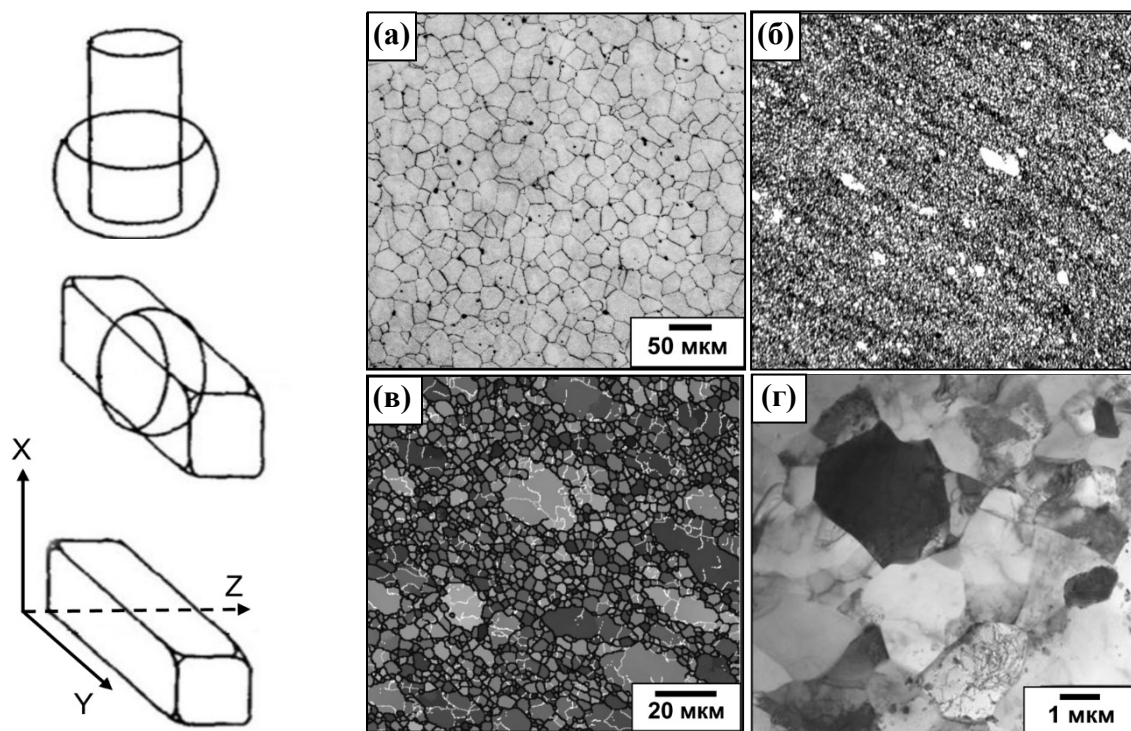


Рисунок 1 (слева) - Схематичное представление процесса ВИК.
Рисунок 2 (справа) - Микроструктура до (а) и после (б-г) ВИК: (а,б) ОМ; (в) EBSD; (г) ПЭМ.

УМЗ сплава, полученного после 8 проходов равноканального углового прессования (РКУП) при 325°C [4]. Видно, что в отличие от РКУП, проведение ВИК при той же температуре не привело к упрочнению сплава. Пластичность при этом возросла значительно больше после ВИК. Такое поведение сплава было обусловлено несколькими причинами. Отсутствие разницы в прочности до и после ВИК было вызвано компенсацией его структурного (Холл-Петчевского) упрочнения от измельчения зерен аналогичным по величине уменьшением вклада в упрочнение от дисперсионного твердения, связанным с некоторым ростом дисперсных частиц $Al_3(Sc,Zr)$ при высокотемпературной обработке [5]. А повышенная прочность РКУП сплава была обусловлена большей (на ~2 порядка), чем при ВИК, скоростью деформации и, соответственно, большей плотностью дефектов. Кроме того, после РКУП фиксировали несколько меньший (~1 мкм) размер зерна [6]. А наибольшую пластичность закономерно демонстрировал материал с наиболее равновесной и однородной УМЗ структурой, формировавшейся в процессе ВИК.

Таблица 1 - Механические свойства при растяжении при комнатной температуре сплава 1570С после обработки методом ВИК и РКУП.

Состояние	Hv	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
Исходное	105±10	240±3	355±6	28±1
ВИК при 325°C	105±10	235±5	360±5	38±3
РКУП Вcz 325°C [4]	-	300±4	380±6	31±2

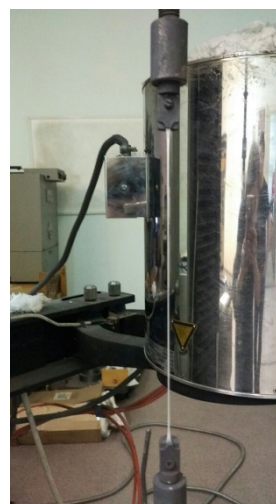
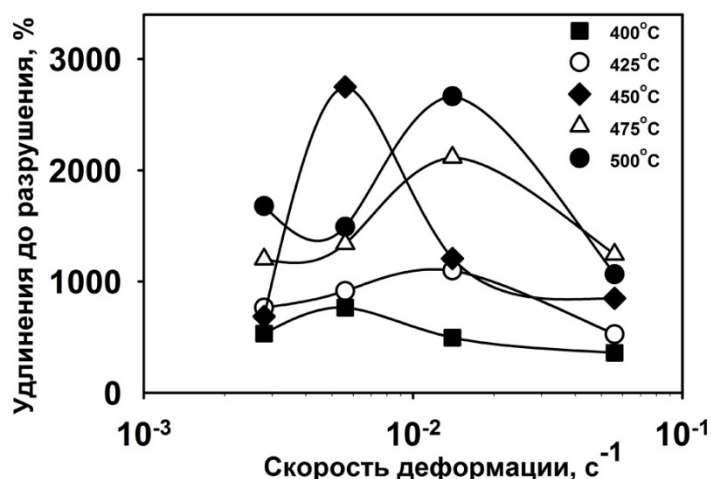


Рисунок 3 - Удлинения до разрушения (а) и внешний вид образца, показавшего наибольшее удлинение при 450°C и $5,6 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, (б) сплава 1570С после ВИК.

Оценка термической стабильности зеренной структуры, полученной ВИК, показала, что она стабильна вплоть до 425°C. При более высоких температурах отмечали аномальный рост зерен, который приводил к трансформации УМЗ структуры в бимодальную, состоящую из областей крупных и мелких зерен.

Исследования свойств при растяжении при повышенных температурах показали, что сплав после ВИК демонстрировал уникальный эффект сверхпластичности в интервале температур 400-500°C с удлинениями до разрушения более 500% при скоростях вплоть до 10^{-1} с^{-1} (рис. 3а). При этом максимальные удлинения до разрушения превышали ~2500% и фиксировались также в довольно широкой температурно-скоростной области, причем при 500°C они наблюдались при скорости деформации $1,4 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Полученные данные свидетельствуют о высоком потенциале промышленного использования ВИК для получения заготовок со стабильной и однородной УМЗ структурой из сплавов типа 1570. При этом на фоне отсутствия значимого упрочнения заметно повышается пластичность сплава при растяжении при комнатной температуре, а при повышенных температурах отмечается эффект структурной сверхпластичности с уникальными показателями в широком температурно-скоростном интервале.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №16-08-01189 А). Исследования проведены на базе центра коллективного пользования ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов».

Литература

- [1] Y. Filatov, V. Elagin, V. Zakharov, Mater. Sci. Eng. A 280, 2000, 97.
- [2] E. Avtokratova, O. Sitdikov, M. Markushev, R. Mulyukov, Mater. Sci. Eng. A 538, 2012, 386.
- [3] R. Imayev, G. Salishchev, O. Senkov, V. Imayev, M. Shagiev, N. Gabdullin, A. Kuznetsov, F. Froes, Mater. Sci. Eng. A 300, 2001, 263.
- [4] R. Kaibyshev, E. Avtokratova, O. Sitdikov, Mater. Sci. Forum 638-642, 2010, 1952.
- [5] E. Avtokratova, O. Sitdikov, O. Mukhametdinova, M. Markushev, S.V.S.N. Murty, M.J.N.V. Prasad, B.P. Kashyap, J. Alloys Compd. 673, 2016, 182.
- [6] O. Sitdikov, Inorg. Mater.: Applied Research 7, 2016, 149.