

- вые и титановые сплавы для авиакосмической техники». М.: ВИАМ. 2002. С. 3–11.
3. Фридляндер И.Н. Воспоминания о создании авиакосмической и атомной техники из алюминиевых сплавов. М.: Наука. 2005. 277 с.
 4. Aluminium Alloys. 2006. ICAA-10. (Vancouver, Canada). 2006. July.
 5. Алюминиевые сплавы. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. М.: Металлургия. 1974. С. 196–276.

УДК 620.172.21:669.157.8:669.718

*Н.И. Колобнев, В.В. Махсидов, С.В. Самохвалов,
С.В. Сбитнева, В.И. Попов, М.Г. Курс*

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ И РЕЖИМОВ СТАРЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВА СИСТЕМЫ Al–Mg–Si–Cu–Zn

Исследовано влияние вида деформации и режимов старения на структуру, механические свойства и склонность к межкристаллитной коррозии (МКК) плит из сплава 1370 системы Al–Mg–Si–Cu–Zn. Деформацию плит проводили между закалкой и искусственным старением прокаткой, растяжением и совместно прокаткой+растяжением. Склонность к МКК сплавов этой системы возможно существенно снизить при применении режимов старения на стадии перестаривания. Однако при этом существенно снижаются прочностные характеристики и появляются питтинги глубиной 0,16–0,28 мм. Применение низкотемпературной термомеханической обработки (НТМО) и оптимизация режима старения позволили уменьшить склонность плит из сплава 1370 к МКК при сохранении высокого уровня прочностных характеристик сплава.

Ключевые слова: Al–Mg–Si–Cu–Zn, НТМО, режимы старения, МКК.

Сплавы 6013 и 6056 системы Al–Mg–Si с повышенным содержанием меди (0,5–1,1%) применяются для элементов обшивки фюзеляжа и внутреннего набора планера самолета, так же как и российский сплав 1370, близкий по химическому составу к сплаву 6056.

Однако сплавы системы Al–Mg–Si–Cu в искусственно состаренном состоянии обладают склонностью к межкристаллитной коррозии (МКК). Существует два известных способа снижения склонности к МКК: дополнительное легирование и применение режимов перестаривания сплава [1, 2].

С целью снижения склонности к МКК сплав 6056 дополнительно легирован Zn (0,1–0,7% по массе) и при его термической обработке применяется двухступенчатый режим старения с перестариванием (Т78) [1–4]. В результате склонность к МКК в сплаве была устранена. При этом существенно снизились характеристики прочности и появилась питтинговая коррозия глубиной до 0,16 мм (табл. 1).

Таблица 1

Влияние режима старения на механические и коррозионные свойства сплава 6056 [3, 4]

Режим старения	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ , %	Вид и глубина коррозионных поражений, мм
	МПа			
180°C, 8–10 ч (Т6)	387	355	7,5	МКК: 0,13
175°C, 6 ч + 190°C, 13 ч (Т78)	364	337	10,5	Питтинг: 0,16

В ряде случаев применение деформации между закалкой и старением может не только увеличить прочностные свойства, но и улучшить коррозионные характеристики полуфабриката [5]. Применение деформации между закалкой и старением в технологическом процессе изготовления полуфабрикатов можно рассматривать как одну из схем низкотемпературной термомеханической обработки (НТМО).

Влияние НТМО на структуру, механические и коррозионные свойства плит

Методика эксперимента

Исследование проводили на промышленных плитах толщиной 12 и 20 мм из сплава 1370. Низкотемпературную термомеханическую обработку плит проводили по схеме закалка+деформация+старение. Часть горячекатаных плит подвергалась стандартной термообработке: закалка, правка растяжением со степенью остаточной деформации $\epsilon=1,5-2\%$ и последующее искусственное старение по режиму 180°C , 10 ч (Т1) [6]. Другая часть горячекатаных плит после закалки подвергалась деформации прокаткой или растяжением ($\epsilon=15\%$) или последовательному сочетанию деформации прокаткой и растяжением ($\epsilon=20\%$) и последующему искусственному старению по одно- (Т1), двух- (А) и трехступенчатым (В) режимам:

Т1 180°C , 10 ч;

А $180^\circ\text{C} + T_2$ ($T_2 < 180^\circ\text{C}$);

В $T_1 + 180^\circ\text{C} + T_3$ ($T_1 < 180^\circ\text{C}$, $T_3 < 180^\circ\text{C}$).

Микроструктуру плит изучали на шлифах вдоль направления прокатки, вырезанных с периферии, с определением длины (Д) и толщины (Т) зерна. Шлифы подвергались анодному оксидированию и просматривались в поляризованном свете. Механические свойства плит определяли на образцах, вырезанных поперек к направлению прокатки. Испытания на МКК проводили с анализом глубины поражений на катаной поверхности плиты.

Исследование влияния НТМО на структуру, механические и коррозионные свойства плит

Сплав 1370 в состоянии Т1, состаренный на максимальную прочность, имеет склонность к МКК глубиной 0,14–0,20 мм. Применение режимов перестаривания устраняет или уменьшает склонность к МКК до глубины менее 0,10 мм, но при этом снижаются прочностные характеристики. Применение НТМО плит из сплава 1370 позволяет сохранить прочностные характеристики и уменьшить склонность к МКК (табл. 2).

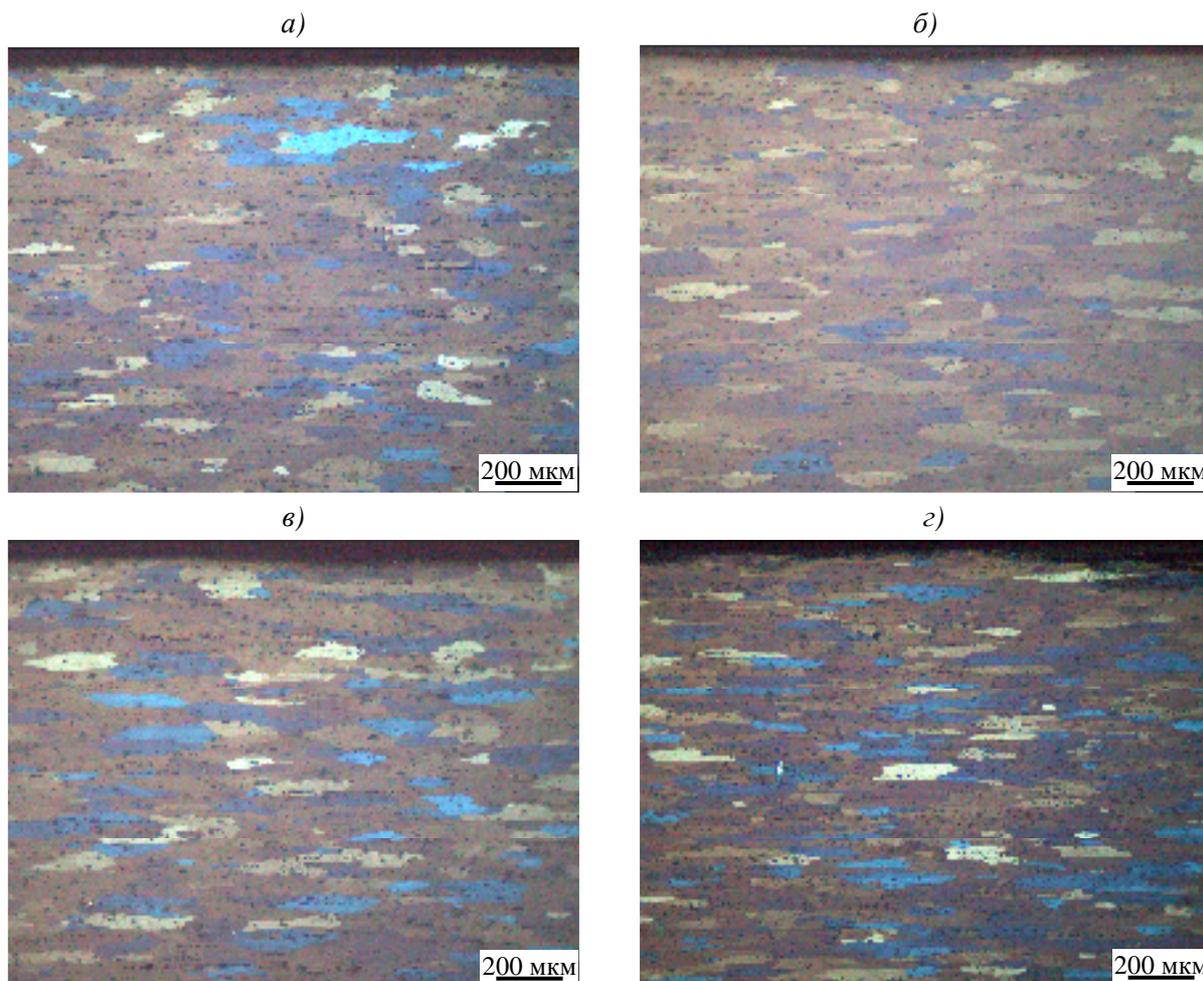
Таблица 2

Влияние вида и степени деформации между закалкой и старением на механические свойства и МКК плит

Режим старения	Вид деформации	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ , %	Максимальная глубина МКК, мм
		МПа			
Т1	Без деформации (исходное состояние)	435	400	13	0,20
	Растяжение ($\epsilon=15\%$)	425	395	11	0,10
	Прокатка ($\epsilon=15\%$)	430	410	11	0,10
	Прокатка ($\epsilon=15\%$) + растяжение ($\epsilon=5\%$)	440	420	8	0,10
А	То же	440	420	7	0,07

Структура плит рекристаллизованная, зерна в плитах вытянуты вдоль направления прокатки, в микроструктуре плит с НТМО наблюдаются полосы скольжения.

Средний размер зерна в плитах, изготовленных без НТМО, составляет (Д×Т): (105–125)×(35–40) мкм (см. рисунок, а). При НТМО плит в случае деформации растяжением с $\epsilon=15\%$ по сравнению с исходным состоянием происходит увеличение средней длины зерна, толщина зерна практически не изменяется. Размер зерна при этом составляет (140–160)×(35–40) мкм (см. рисунок, б). При НТМО плит в случае деформации прокаткой с $\epsilon=15\%$ по сравнению с исходным состоянием средняя длина зерна также увеличивается, но в меньшей степени по сравнению с вариантом НТМО с деформацией растяжением, средняя толщина уменьшается и размер зерна составляет (125–145)×(30–35) мкм (см. рисунок, в). При НТМО плит с последовательным сочетанием деформации прокаткой с $\epsilon=15\%$ и растяжением с $\epsilon=5\%$ по сравнению с исходным состоянием также происходит увеличение средней длины и уменьшение средней толщины зерна до размера (120–140)×(20–25) мкм (см. рисунок, г).



Микроструктура ($\times 25$) плит из сплава 1370 без НТМО (а), с НТМО и деформацией растяжением с $\epsilon=15\%$ (б), прокаткой с $\epsilon=15\%$ (в) и прокаткой с $\epsilon=15\%$ + растяжением с $\epsilon=5\%$ (г)

НТМО при деформации прокаткой позволяет получить большие значения прочностных характеристик при МКК: $\leq 0,10$ мм. Однако при деформации прокаткой требуется последующая правка плит. Применение двухступенчатого режима старения А позволяет сохранить высокий уровень прочностных характеристик и несколько уменьшить склонность к МКК по сравнению с вариантом НТМО, при котором используется одноступенчатый режим старения Т1.

Применение трехступенчатого режима старения В при НТМО с деформацией после закалки только растяжением с $\varepsilon=15\%$ позволяет сохранить прочностные характеристики при некотором снижении уровня МКК до 0,07 мм (табл. 3).

Таблица 3

Влияние трехступенчатых режимов старения на механические и коррозионные свойства плит с НТМО при деформации растяжением

Режим старения (см. с. 13)	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ , %	Максимальная глубина МКК, мм
	МПа			
В	440	420	8,0	0,07

Трехступенчатый режим старения В по сравнению с одноступенчатым режимом Т1 при НТМО с деформацией только растяжением с $\varepsilon=15\%$ позволяет получить механические свойства на 15 МПа больше по пределу прочности и на 25 МПа больше по пределу текучести при МКК: $\leq 0,10$ мм (см. табл. 3).

При применении НТМО для плит происходит изменение размеров зерна, обусловленное схемой приложения и величиной действующих сил при растяжении или прокатке плиты.

Применение НТМО с деформацией после закалки только растяжением с $\varepsilon=15\%$ и старение по трехступенчатому режиму $T_1+180^\circ\text{C}+T_3$ для плит из сплава 1370 позволяет обеспечить МКК: $\leq 0,10$ мм при сохранении высоких прочностных характеристик.

Уменьшение склонности к МКК при применении НТМО может быть связано с изменением разницы электрических потенциалов между зерном и его приграничной зоной в результате изменения морфологии выделений в объеме и по границам зерна под влиянием деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yamaguchi K., Tohma K. Effect of Zn addition on intergranular corrosion resistance of Al–Mg–Si–Cu alloys //Proceedings of 6-th International Conference on Aluminium Alloys (Japan), The Japan Institute of Light Metals. 1998. V. 3. P. 1657–1662.
2. Dif R., Bechet D., Warner T., Ribes H. 6056T78: a corrosion resistant copper-rich 6XXX alloy for aerospace applications //Proceedings of 6-th International Conference on Aluminium Alloys (Japan), The Japan Institute of Light Metals. 1998. V. 3. P. 1991–1996.
3. Dif R., Bès B., Ehrström J.C., Sigli C., Warner T.J., Lassince Ph., Ribes H. Understanding and modelling the mechanical and corrosion properties of 6056 for aerospace applications //Proceedings of 7-th International Conference on Aluminium Alloys (Virginia), Trans Tech Publications Ltd. 2000. V. 1. P. 1613–1618.
4. Bakavos D., Prangnell P.B., Dif R. A Comparison of the Effects of Age forming on the Precipitation Behaviour in 2XXX, 6XXX and 7XXX Aerospace Alloys //Proceedings of 9-th International Conference on Aluminium Alloys (Australia), Institute of Materials Engineering Australasia Ltd. 2004. P. 124–131.
5. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. Т. 1. М.: Металлургия. 1968. С. 329–343.
6. Махсидов В.В., Самохвалов С.В., Колобнев Н.И., Попов В.И., Савенок М.Г. Влияние деформации после закалки и режимов старения на склонность к межкристаллитной коррозии сплавов системы Al–Mg–Si–Cu //Сб. науч. трудов Международной науч.-технич. конференции «Современные проблемы металловедения сплавов цветных металлов». М.: МИСиС. 2009. 462 с.