

УДК 66.026.4: 669.018.8
DOI:10.30987/2223-4608-2020-4-9-17

Май Суан Зунг, аспирант,
Ю.А. Пучков, к.т.н.,
А.И. Плохих, к.т.н.
(ФГБОУ ВО «МГТУ имени Н.Э. Баумана», НИУ, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1),
И. Бенариеб, инженер
(ГНЦ РФ «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»)
E-mail: Putchkov_bmstu@mail.ru

Влияние режимов термической обработки на закалочные напряжения и свойства сплава Д16

Приведены результаты исследования влияния термической обработки, включающей закалку в воде, восходящую закалку (охлаждение закаленного сплава в жидком азоте, выдержку и нагрев в горячем минеральном масле), а также естественное или искусственное старение на свойства прутков деформируемого алюминиевого сплава Д16. Методом сверления отверстий определено влияние режимов этой термической обработки на остаточные напряжения.

Ключевые слова: термическая обработка; восходящая закалка; алюминиевые сплавы; остаточные напряжения; коррозия; механические и коррозионные свойства.

May Suan Zung, Post graduate student,
Yu.A. Puchkov, Can. Sc. Tech.,
A.I. Plokhikh, Can. Sc. Tech.
(FSBEI HE "Bauman STU of Moscow, RU, 1 Building, 5, 2-d Baumanskaya Str., Moscow, 105005)
I. Benarieb, Engineer
(SNC RF "All-Russian Research Institute of Aviation Materials")

Impact of thermal treatment modes upon hardening stresses and properties of D16 alloy

The investigation results of the impact of thermal treatment including water hardening, ascending hardening (hardened alloy cooling in liquid nitrogen, aging and heating in hot coal oil), and also natural or artificial aging upon properties of the bars of D16 deformed aluminum alloy are shown. Through the method of hole drilling there is defined a mode impact of this thermal treatment upon residual stresses.

Keywords: thermal treatment; ascending hardening; aluminum alloys; residual stresses; warp; stress-strain and corrosion properties.

Введение

Благодаря низкой плотности, высоким механическим и технологическим свойствам алюминиевые сплавы занимают важное место среди конструкционных материалов, применяемых в авиастроении и других областях техники [1, 2].

Термическая обработка (закалка и старение), а также термомеханическая обработка [3] значительно повышают конструкционную прочность термически упрочняемых алюминиевых сплавов. Однако эти процессы сопровождаются появлением нежелательных напряжений, как во время обработки, так и после нее.

Напряжения приводят к упругой и пластической деформации, короблению, увеличению припусков и объема механической обработки, снижению точности обработки и стабильности размеров обрабатываемых изделий, а также снижают их прочность, надежность и долговечность [4 – 6]. Для выполнения этих требований выбирают охлаждающие закалочные среды и их температуру [7]. Хороших результатов при этом добиваются, применяя теорию закалочного фактора, для реализации которой необходимо определение режимов охлаждения в различных точках изделия (например, применяя программный комплекс ANSYS), наличие диаграммы изотермического распада

обрабатываемого сплава и специального программного обеспечения [8 – 12].

Следующим шагом в совершенствовании технологии упрочнения алюминиевых сплавов является еще недостаточно изученная технология, включающая восходящую закалку [13 – 15]. По данной технологии детали после закали в воде, охлаждают до низких температур, например, погружением в жидкий азот, а затем быстро нагревают в кипящей воде, высокоскоростном паре или горячем масле. Показано, что остаточные напряжения, возникающие при обработке этим методом, могут быть уменьшены на 90 %, по сравнению с обычной термической обработкой [14]. При этой обработке происходит снижение остаточных напряжений и коробления, так как при восходящей закалке направление напряжений и деформации противоположно напряжениям и деформации, возникающим при предшествующей ей закалке в воде. В данном случае восходящая закалка является разновидностью поверхностного упрочнения, позволяющего повысить конструкционную прочность изделия.

Восходящая закалка может быть применена для ряда высокоточных фасонных крупногабаритных изделий, например полых профилей, в частности труб [16], вафельных конструкций, рамок инерционных систем позиционирования, крупногабаритных зеркал телескопов [4] и т.д.

Целью данной работы является исследование влияния восходящей закали на остаточные напряжения, механические и коррозионные свойства сплава Д16 после естественного и искусственного старения.

Материалы и методика исследования

Объектом исследований являлись, изготовленные из пресованных прутков сплава Д16Т, кольцевые образцы с внешним диаметром 60 мм, внутренним диаметром 40 мм, толщиной 10 мм, а также изготовленные по ГОСТ 1497-84, разрывные цилиндрические образцы типа VII с диаметром рабочей части 6 мм. Химический состав сплава определен на атомно-эмиссионном спектрометре с лазерным возбуждением «ЛАЭС» (табл. 1).

1. Химический состав образцов из исследованного сплава Д16

Сплав	Содержание элементов, % мас.								
	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Cr	Ti	Al
Д16	4,35	1,50	0,60	0,50	0,50	0,10	0,16	0,07	основа

Термическую обработку проводили в шахтных печах. Последовательность и режимы термической обработки приведены в табл. 2 и на рис.1.

2. Режимы термической обработки образцов из сплава Д16

Номер образца	Режим термической обработки		
	Закалка	Восходящая закалка	Старение
1	нагрев в соляной ванне до 495 ± 2 °С и выдержка 20 мин с последующим охлаждением и выдержкой 5 мин в воде с температурой 40 ± 1 °С;	охлаждение и выдержка 5 мин в жидком азоте до минус 196 °С, нагрев с минус 196 °С и выдержка 5 мин в масле с температурой 175 ± 2 °С	при 190 ± 1 °С продолжительностью 12 ч
2		не проводили	при 20 ± 2 °С продолжительностью 100 ч
3	нагрев в соляной ванне до 495 ± 2 °С и выдержка 20 мин с последующим охлаждением и выдержкой 5 мин в воде с температурой 40 ± 1 °С	не проводили	при 190 ± 1 °С продолжительностью 12 ч
4		не проводили	при 20 ± 1 °С продолжительностью 100 ч

Для поддержания температуры в соляной и масляной ванне использовали аттестованные хромелькопелевые термопары и микропроцессорный измеритель – регулятор температуры 2ТРМ1-Ц2.У.РР. В качестве рабочей среды соляной ванны использовали смесь солей: 55 % NaNO_3 + 45 % NaNO_2 , масла – «Термойл 26».

Для выравнивания температуры внутри ванн их содержимое во время выдержек в них образцов тщательно перемешивали. Образцы 1 и 3 подвергали искусственному старению камерной печи BINDER ED-23 в течение 12 ч в, образцы 2 и 4 – естественному старению продолжительностью 100 ч.

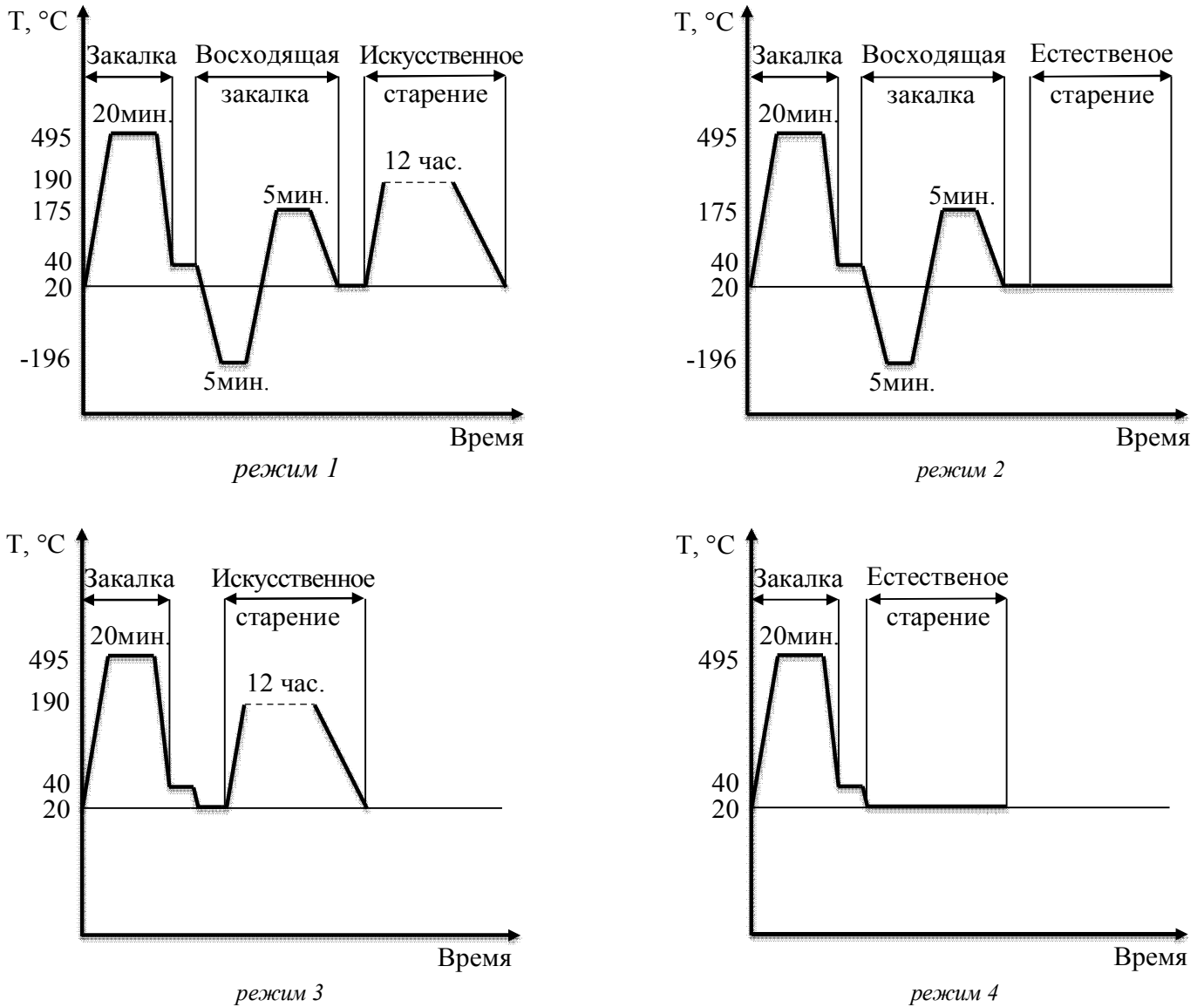


Рис. 1. Схемы термообработки образцов из сплава Д16 по режимам 1...4 (см. табл. 2)

Определение остаточных напряжений в образцах выполняли методом сверления по стандарту ASTM E837-08 [5 – 7], используя тензодатчики типа В (рис. 2). Сверление перпендикулярно внешней цилиндрической поверхности на глубину 2 мм выполняли конической торцевой пальчиковой фрезой диаметром 1,8 мм (рис. 2). Мостовая схема, используемая для определения остаточных напряжений, приведена на рис. 3.

Остаточные максимальные и минимальные напряжения σ_{\max} и σ_{\min} рассчитывали, используя следующее уравнение [4]:

$$\sigma_{\max}, \sigma_{\min} = \frac{E}{2(1-\nu^2)} [(1 + \nu)(\epsilon_a + \epsilon_c) \pm (1 - \nu)\sqrt{2\{(\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_b - \epsilon_c)^2\}}],$$

где $\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_c$ – измеренные деформации в направлениях a, b и c ; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга.

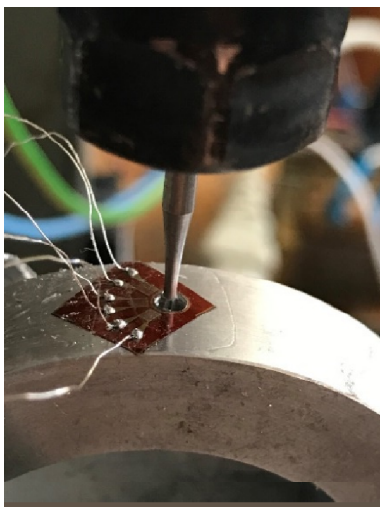
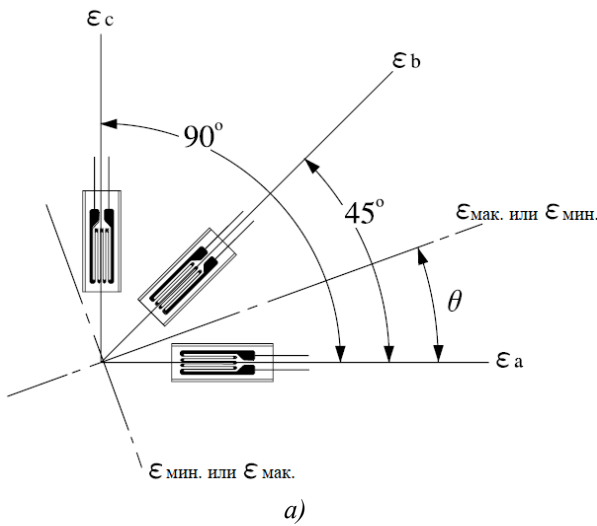


Рис. 2. Схема тензодатчика типа В (а) и образец с наклеенным тензодатчиком в процессе сверления (б)

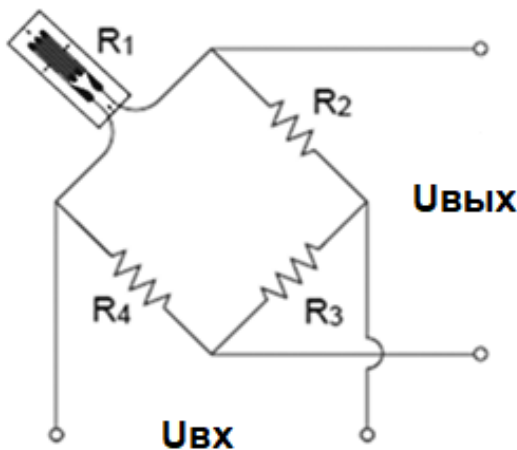


Рис. 3. Мостовая схема для определения остаточных напряжений:

R_1 – активное сопротивление тензорезистора; R_2, R_3, R_4 – активное сопротивление плеч измерительного моста; $U_{вх}$ и $U_{вых}$ – входное и выходное напряжения измерительного моста

Микротвердость образцов измеряли на твердометре EMCO-TEST Durascan 20 по методу Виккерса с нагрузкой 100 г и выдержкой 10 с в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007.

Удельная электрическая проводимость поверхностной зоны образцов определена вихретоковым измерителем ВЭ-27НЦ, принцип действия которого основан на анализе параметров (фазы) электромагнитного поля вихревых токов при взаимодействии вихретокового преобразователя прибора с поверхностным слоем исследуемого металла.

Испытания на разрыв выполняли по ГОСТ 1497-84 (Методы испытаний на растяжение) на разрывной машине Z100 производства фирмы Zwick/Roell. Расчет основных характеристик проводился автоматизировано, с помощью штатной программы сбора и обработки данных.

Исследование процессов коррозии выполняли с использованием потенциостата IPC-Pro MF и анализатора частотного отклика FRA-2, применяемого для электрохимической импедансной спектроскопии. Для проведения потенциодинамических коррозионных исследований использована электрохимическая ячейка с хлорсеребряным электродом сравнения и вспомогательным платиновым электродом. Исследования выполнены в 3%-ном водном растворе NaCl. После формирования на поверхности образца стабильного потенциала коррозии снимали катодную и анодную поляризационные кривые со скоростью развертки потенциала 1,0 мВ/с. Значения потенциалов пересчитаны по отношению к нормальному водородному электроду по следующему соотношению:

$$E_{н.в.э} = E_{х.с.э} + 0,222, \text{ В.}$$

Для определения плотности коррозионного тока использовали метод поляризационного сопротивления и статистическую обработку результатов для 20 точек поляризационной диаграммы, отличающихся на 10...20 мВ от потенциала коррозии [8].

Импедансные измерения проводили при потенциале свободной коррозии в диапазоне частот 0,03...50000 Гц. Амплитуда переменного сигнала составляла 0,01 В. Исследования проводили на участках внешней цилиндрической поверхности образцов, погруженных в 3%-ный водный раствор NaCl.

Результаты исследования и обсуждение полученных результатов

На рис. 4 приведены результаты определе-

ния остаточных напряжений методом сверления. Термическая обработка, включающая охлаждение образцов в жидком азоте с последующим нагревом в минеральном масле до температуры 180 °С, уменьшает максимальные остаточные напряжения в образцах после искусственного старения от 140 до 40 МПа,

т.е. на 71 %, а после естественного старения – от 175 до 130 МПа, т.е. на 26 %. Причиной снижения остаточных напряжений при нагреве от температуры жидкого азота минус 196 °С до температуры нагретого до 180 °С масла является появление градиента температур и развитие пластической деформации.

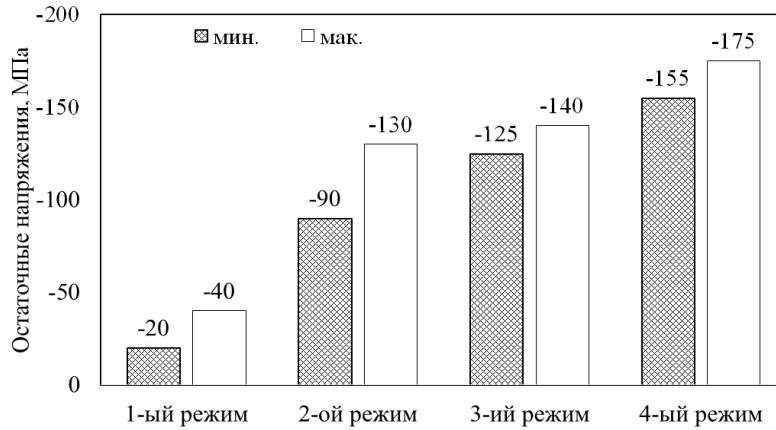


Рис. 4. Минимальные и максимальные остаточные напряжения в кольцевых образцах, термообработанных по режимам (см. табл. 2)

На рис. 5 и в табл. 3 приведены результаты измерения микротвердости, изменяющейся по параболическому закону, на боковой поверхности кольцевого образца. Максимальная твердость наблюдается вблизи внешней и внутренней цилиндрических поверхностей кольца, минимальная – в центре боковой поверхности. Охлаждение в жидком азоте с последующим нагревом в минеральном масле увеличивает твердость на $6 \pm 0,5$ HV после естественного старения, и на $4 \pm 0,5$ HV после искусственного старения. Вероятно, указанное распределение твердости после старения связано с пластической деформацией и увеличением при восходящей закалке плотности дислокаций, служащими центрами образования мелкодисперсных упрочняющих выделений при старении.

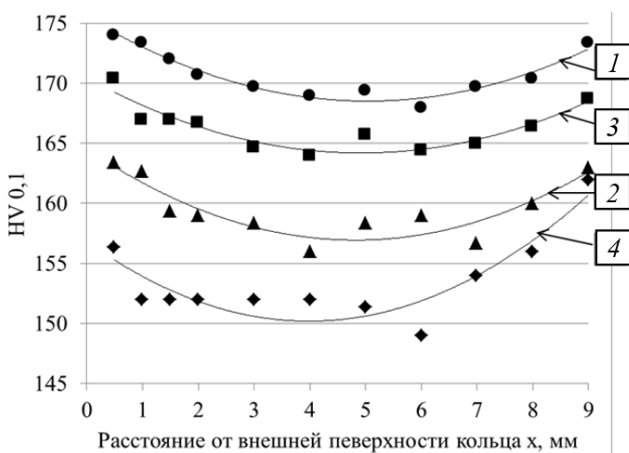


Рис. 5. Изменение микротвердости на боковой поверхности кольцевых образцов, термообработанных по режимам 1...4

Образцы, при термической обработке которых применяли восходящую закалку, по прочности и пластичности показали характеристики, превосходящие требования к этим сплавам после типичной термообработ-

ки (табл. 4). Применение восходящей закалки перед естественным старением может приводить к небольшому снижению прочности и пластичности, вероятно, из-за снижения уровня сжимающих напряжений и огрубления структуры в поверхностной зоне образцов при нагреве в масле перед естественным старением.

На рис. 6 приведены результаты измерения удельной электропроводности сплава под внешней цилиндрической поверхностью кольцевых образцов. Как показано на рис. 6, при применении восходящей закалки повышается электропроводность. Это можно объяснить тем, что при восходящей закалке понижаются напряжения и тем, что восходящая закалка сопровождается пластической деформацией поверхностного слоя металла, в результате чего образуются дислокации, служащие при старении центрами образования упрочняющих выделений, что должно приводить к снижению искажения кристаллической решетки матричного твердого раствора в результате его более полного распада.

3. Зависимость микротвердости 0,1 HV от расстояния x до внешней поверхности кольца и величина достоверности аппроксимации R^2

Режимы термической обработки	0,1 HV	R^2
1	$HV_{0,1} = 0,2767x^2 - 2,7873x + 175,53$	0,9456
2	$HV_{0,1} = 0,2582x^2 - 2,5406x + 170,44$	0,8514
3	$HV_{0,1} = 0,3266x^2 - 3,1507x + 164,53$	0,7989
4	$HV_{0,1} = 0,4186x^2 - 3,3372x + 156,83$	0,8206

4. Результаты определения механических свойств образцов из сплава Д16 при испытании на растяжение

	Термообработка							
	T1				T			
	σ_B МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ %	Ψ , %	σ_B МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ %	Ψ , %
С криогенной обработкой	463... 460	385... 380	16,3... 16,7	26,2... 27,0	465... 470	285... 288	20,0... 13,3	31,0... 30,0
Без криогенной обработки	461... 464	383... 385	11,7... 15,0	26,5... 22,0	497... 486	332... 321	21,7... 20,0	26,3... 25,5
Требования	$\geq 425^*$	$\geq 345^*$	$\geq 5^*$	–	$\geq 390^*$ *	$\geq 275^*$ *	$\geq 10^{**}$	–

Примечания: * Требования к прутку из сплава 2024 Т6 [17].
** ГОСТ 21488-97 «Прутки прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов».

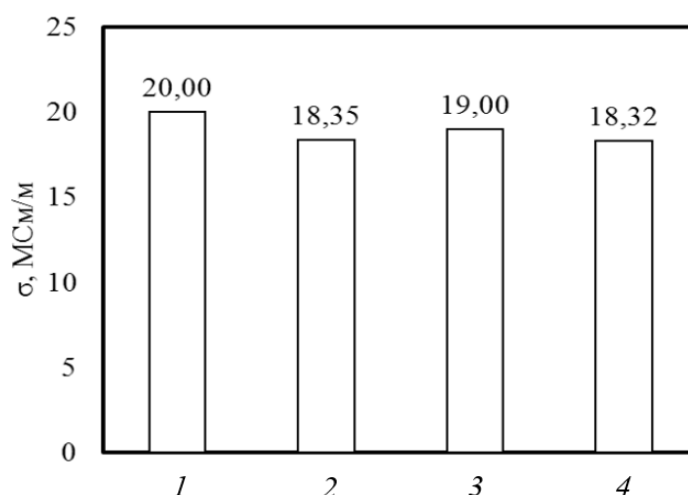


Рис. 6. Удельная электропроводность сплава под внешней цилиндрической поверхностью кольцевых образцов, термообработанных по режимам 1...4

На рис. 7, 8 и в табл. 5 приведены результаты коррозионных исследований. Восходящая закалка не оказывает на потенциалы коррозии такого сильного влияния как вид старения.

Тем не менее, потенциалы коррозии образцов (см. рис. 7), к которым применяли восходящую закалку, выше, чем у образцов, которые закаливали только в воде и старили.

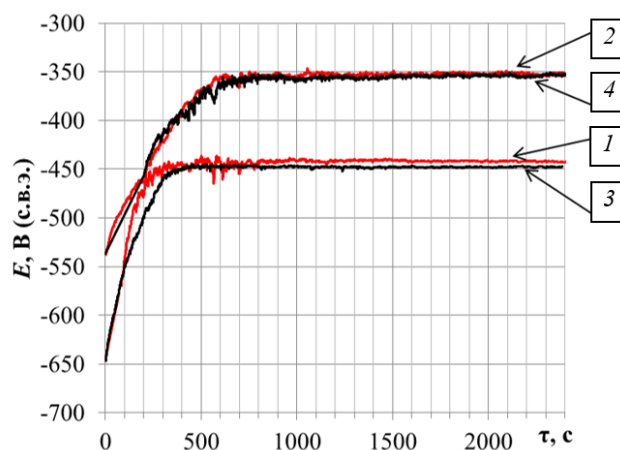


Рис. 7. Кинетика изменения потенциала в 3 %-ном в водном растворе NaCl образцов, обработанных по режимам 1...4

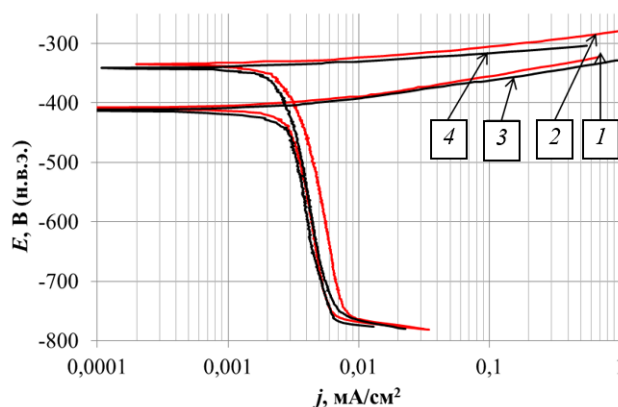


Рис. 8. Результаты потенциодинамического анализа образцов в 3 %-ном водном растворе NaCl, обработанных по режимам 1...4

5. Результаты потенциодинамического анализа в 3 %-ном водном растворе NaCl образцов из сплава Д16, термообработанных по режимам 1...4

Коррозионные характеристики	Номер режима обработки			
	1	2	3	4
$E_{корр}$, мВ	-408,6	-335,4	-405,8	-341,5
R_p (кат.), Ом	6260	7576	7365	7150
R_p (ан.), Ом	2740	1238	2397	1055
$b_{кат}$, мВ	-775	-491	-738	-506
$b_{ан}$, мВ	38	46	-	-
$i_{корр}$, мкА/см ²	2,7	2,3	2,6	2,1
$K_{П}$, мм/год	0,030	0,025	0,028	0,022
Балл	4	4	4	4
Характеристика коррозионной стойкости сплава	стойкий	стойкий	стойкий	стойкий

На рис. 8 приведены результаты коррозионных исследований потенциодинамическим

методом. Скорость общей коррозии в данной среде определяется скоростью катодного про-

цесса $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow OH^-$, протекающего медленнее анодного процесса ионизации металла $Me \rightarrow Me^{n+} + ne^-$. К такому выводу приводит анализ данных расчета, приведенных в табл. 5, где показано, что поляризационные сопротивления катодных процессов R_p и коэффициенты b в уравнениях Тафеля выше, чем для анодных процессов.

Небольшое увеличение скорости коррозии у образцов, к которым применена восходящая закалка, вероятно, связано с увеличением дисперсности структуры, увеличением энергии и реакционной способности сплава. После всех четырех видов термической обработки сплав имеет 4 балла коррозионной стойкости, т.е. характеризуется в данной среде как стойкий.

Заключение

Предлагаемая термическая обработка, включающая охлаждение исследованных образцов из сплава Д16 после закалки в воде с последующим охлаждением в жидком азоте до минус 196 °С и нагревом в масле до 180 °С уменьшает максимальные остаточные напряжения в образцах после естественного старения от 175 до 130 МПа, т.е. на 26 %, а после искусственного старения от 140 до 40 МПа, т.е. на 71 %.

В результате применения восходящей закалки наблюдается повышение электропроводности. Это можно объяснить не только снижением остаточных напряжений, но, вероятно, и более полным распадом при старении пересыщенного твердого раствора.

Восходящая закалка увеличивает твердость в поверхностной зоне изделия и практически не влияет на коррозионную стойкость сплава после старения. Упрочнение поверхностной зоны тем не менее может и не вызывать увеличение прочности изделий при испытании на растяжение, так как может сопровождаться снижением сжимающих напряжений в их поверхностной зоне. Температура масла и продолжительность пребывания изделия в нем после восходящей закалки не должны приводить к нежелательным изменениям в структуре закаленного сплава.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антипов, В.В., Сенаторова, О.Г., Ткаченко, Е.А., Вахромов, Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 167-182.

2. История авиационного материаловедения: ВИАМ – 75 лет поиска, творчества, открытий / под общ. ред. Е.Н. Каблова. – М.: Наука, 2007. – 343 с.

3. Рабинович, М.Х. Термомеханическая обработка алюминиевых сплавов. – М.: Машиностроение, 1972. – 169 с.

4. Newsander, T.; Crowther, B.; Gubbels, G.; and Senden, R., Aluminum Alloy AA-6061 and RSA-6061 Heat Treatment for Large Mirror Applications /Space Dynamics Lab Publications. Issue 8837. 2013. P. 102. https://digitalcommons.usu.edu/sdl_pubs/102

5. Шведова, А.С. Повышение эксплуатационных свойств деталей при обработке динамическими методами поверхностного пластического деформирования // Вестник Донского государственного университета. – 2015. – Т. 15. – №1. – С. 114-120.

6. Чернышев, Г.Н., Попов, А.Л., Козинцев, В.М. Полезные и опасные остаточные напряжения // Природа. – 2002. – № 10. – С. 1-10.

7. Райцес, В.Б. Термическая обработка на металлургических заводах. – М.: Металлургия, 1971. – 248 с.

8. Пучков, Ю.А., Ван Яньлун, Ампилогов, А.Ю. [и др.] Исследование влияния скорости охлаждения при закалке на структуру и свойства сплава В91ТЗ системы Al-Zn-Mg-Cu // Технология металлов. – 2010. – № 8. – С. 15-21.

9. Пучков, Ю.А., Ван Яньлун, Полянский В.М. [и др.] Исследование распада переохлажденного твердого раствора алюминиевого сплава В91 системы Al-Zn-Mg-Cu // Митом. – 2010. – № 8. – С. 16-22.

10. Бенариев, И., Пучков, Ю.А., Клочко, Г.Г., Лощинин, Ю.В., Сбитнева, С.В. Исследование влияния скорости охлаждения при закалке на структуру и свойства листов из высокотехнологичного сплава В-1341 системы Al-Mg-Si // Материаловедение. – 2019. – № 7. – С. 43-48.

11. Пучков, Ю.А., Полянский, В.М., Седова Л.А. Исследование влияния режимов изотермической закалки на структуру и свойства алюминиевого сплава В-1341Т // Материаловедение и термическая обработка металлов. – 2019. – № 2. – С. 13-19.

12. Бенариев, И. Прогнозирование влияния режима закалки на механические свойства листов из термически упрочняемого алюминиевого сплава В-1341 / И. Бенариев, Ю.А. Пучков, Г.Г. Клочков, Ю.В. Лощинин, С.В. Сбитнева // Роль фундаментальных исследований при реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»: Материалы IV Всероссийской конференции. – 2018. – С. 58-70.

13. Simencio E.C.A, Totten G.E., Canale L.C.F. Uphill quenching of aluminum: a process overview // International Heat Treatment and Surface Engineering, Vol. 5, Issue 1. 2011. P. 26-30.

14. Totten G.E, Mackenzie D.S. Aluminum quenching technology: a review, Material Science Forum, Vol. 331-337. 2000. P. 589-594.

15. Lados D.A., Apelian D., Wang L. Minimization of residual stress in heat-treated Al-Si-Mg cast alloys using uphill

quenching: Mechanisms and Effects on Static and Dynamic Properties // Materials Science and Engineering: A. Vol. 527. Issue 13–14. 2010. P. 3159–3165.

16. Hak-Jin Lim, Dae-Hoon Ko, Dae-Cheol Ko, and Byung-Min Kim. Reduction of Residual Stress and Improvement of Dimensional Accuracy by Uphill Quenching for Al6061 Tube // Metallurgical and materials transactions B. Vol. 45. Issue 2. April 2014. P. 472-481.

17. Davis J.R. ASM Speciality Handbook: Aluminium and Aluminium Alloys // ASM International. 1993. 784 P.

REFERENCES

1. Antipov, V.V., Senatorova, O.G., Tkachenko, E.A., Vakhromov, P.O. *Aluminum deformed alloys // Aviation Materials and Technologies*. – 2012. – No.5. – pp. 167-182.

2. *History of Aviation Material Science: VIAM – 75 Years of Search, Creation and Discoveries /* under the general editorship of E.N. Kablov. – M.: Science, 2007. – pp. 343.

3. Rabinovich, M.H. *Aluminum Alloy Thermal Machining*. – M.: Mechanical Engineering, 1972. – pp. 169.

4. Newsander, T.; Crowther, B.; Gubbels, G.; and Senden, R., *Aluminum Alloy AA-6061 and RSA-6061 Heat Treatment for Large Mirror Applications /* Space Dynamics Lab Publications. Issue 8837.2013. P. 102. https://digitalcommons.usu.edu/sdl_pubs/102.

5. Shvedova, A.S. *Increase of parts operation properties at processing with dynamic methods of surface plastic deformation // Bulletin of Don State University*. – 2015. – Vol.15. – No.1. – pp. 114-120.

6. Chernyshov, G.N., Popov, A.L., Kozintsev, V.M. *Useful and dangerous residual stresses // Nature*. – 2002. – No.10. – pp. 1-10.

7. Raitses, V.B. *Thermal Treatment at Metallurgical Enterprises*. – M.: Metallurgy, 1971. – pp. 248.

8. Puchkov, Yu.A., Van Yanlun, Ampilgov, A.Yu. [et al.] *Investigation of cooling rate impact at hardening upon structure and properties of alloy V91T3 of Al-Zn-Mg-Cu system // Metal Technology*. 2010. – No.8. – pp. 15-21.

9. Puchkov, Yu.A., Van Yanlun, Polyansky V.M. [et al.] *Investigation of supercooled solid solution dissociation of*

aluminum alloy V91 of Al-Zn-Mg-Cu system // MiTOM. – 2010. – No.8. – pp. 16-22.

10. Benarieb, I., Puchkov, Yu.A., Klochko, G.G., Loshchinin, Yu.V., Sbitneva, S.V. *Investigation of cooling rate impact at hardening upon structure and properties of sheets of high-technological alloy V-1341 of Al-Mg-Si system // Material Science*. – 2019. – No.7. – pp. 43-48.

11. Puchkov, Yu.A., Polyansky, V.M., Sedova, L.A. *Investigation of isothermal hardening mode impact upon structure and properties of aluminum alloy V-1341T // Metal Science and Metal Thermal Treatment*. – 2019. – No.2. – pp. 13-19.

12. Benarieb, I. *Prognostics of hardening mode impact upon stress-strain properties of sheets of alloy V-1341 thermally hardened /* I. Benarieb, Yu.A. Puchkov, G.G. Klochkov, Yu.V. Loshchinin, S.V. Sbitneva // *Role of Fundamental Investigations at Realization of “Strategic Directions of Development of Materials and Technologies of Their Processing up to 2030”*: Proceedings of the IV-th All-Russian Conf.- 2018. – pp. 58-70.

13. Simencio E.C.A, Totten G.E., Canale L.C.F. *Uphill quenching of aluminum: a process overview // International Heat Treatment and Surface Engineering*, Vol. 5, Issue 1. 2011. P. 26-30.

14. Totten G.E, Mackenzie D.S. *Aluminum quenching technology: a review*, Material Science Forum, Vol. 331-337. 2000. P. 589–594.

15. Lados D.A., Apelian D., Wang L. *Minimization of residual stress in heat-treated Al–Si–Mg cast alloys using uphill quenching: Mechanisms and Effects on Static and Dynamic Properties // Materials Science and Engineering: A*. Vol. 527. Issue 13–14. 2010. P. 3159–3165.

16. Hak-Jin Lim, Dae-Hoon Ko, Dae-Cheol Ko, and Byung-Min Kim. *Reduction of Residual Stress and Improvement of Dimensional Accuracy by Uphill Quenching for Al6061 Tube // Metallurgical and materials transactions B*. Vol. 45. Issue 2. April 2014. P. 472-481.

17. Davis J.R. *ASM Speciality Handbook: Aluminium and Aluminium Alloys // ASM International*. 1993. 784 P.

Рецензент д.т.н. А.И. Гневко

