

ВЗАИМОСВЯЗЬ СТРУКТУРЫ И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ В СПЛАВЕ 1370 СИСТЕМЫ Al–Mg–Si–Cu–Zn*

Проанализированы возможные пути снижения склонности к МКК и в результате проведенных исследований, выполненных на листах и плитах из сплава 1370, установлены некоторые закономерности: склонность к межкристаллитной коррозии снижается при увеличении соотношения Mg к Si, при уменьшении ширины приграничной зоны, свободной от выделений, и плотности выделений на границах зерен в результате применения ступенчатых режимов старения.

Ключевые слова: система Al–Mg–Si–Cu, сплав 1370, структура, межкристаллитная коррозия, зоны, свободные от выделений, многоступенчатое старение.

V.V. Makhsidov¹, N.I. Kolobnev¹, S.A. Karimova¹, S.B. Sbitneva¹

INTERRELATION BETWEEN THE STRUCTURE AND CORROSION RESISTANCE IN 1370 ALLOY OF Al–Mg–Si–Cu–Zn SYSTEM

The possible ways of decreasing the intercrystalline corrosion susceptibility (ICS) were analyzed and as a result of the performed studies with the use of 1370 sheets and plates some regularities were established: ICS is reduced with the increase of the relation between Mg and Si and the decrease of the near-frontier precipitation free zone width and the precipitation density at the grain boundaries as a result of using the step-by-step ageing conditions.

Key words: Al–Mg–Si–Cu system, 1370 alloys, structure, intercrystalline corrosion, precipitation-free zone, multistage ageing.

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Высокотехнологичные сплавы средней прочности системы Al–Mg–Si обладают хорошим сопротивлением общей коррозии и практически не чувствительны к коррозионному растрескиванию. Однако эти сплавы проявляют склонность к межкристаллитной коррозии (МКК) в искусственно состаренном состоянии. Для увеличения прочностных характеристик некоторые сплавы дополнительно легируют Cu в небольшом количестве. Сплавы системы Al–Mg–Si–Cu применяются для элементов обшивки фюзеляжа и внутреннего набора планера самолета. Для перспективных сплавов авиационного назначения 1370, 6013 и 6056 с содержанием меди до 1% (по массе) проблема снижения склонности к МКК стоит наиболее остро.

В сплавах системы Al–Mg–Si–Cu после искусственного старения в приграничной области, как правило, наблюдаются зоны, свободные от выделений (ЗСВ), выраженные в большей или меньшей степени. В работах [1, 2] приведен электрохимический механизм МКК для сплава системы Al–Mg–Si–Cu и показано, что катодом является тело зерна, а анодом – его приграничная зона. Из электрохимии также известно, что в зависимости от величины тока между микрогальваническими парами происходит растворение анода, т. е. растворение материала из области границы зерна. Данное обстоятельство приводит к развитию МКК. На ширину ЗСВ можно влиять режимами термической и термомеханической обработки.

* Авторы выражают благодарность С.В. Самохвалову, В.И. Попову, В.Н. Головиной, М.Г. Курсу (ФГУП «ВИАМ») за помощь при подготовке данного материала.

Для сплавов системы Al–Mg–Si–Cu для снижения склонности полуфабрикатов к МКК применяют: дополнительное легирование сплава, оптимизацию его состава в пределах стандарта на химический состав, режимы перестаривания и низкотемпературной термомеханической обработки (НТМО) [1–6].

В данной работе исследовалось влияние ширины зон, свободных от выделений, и соотношения Mg/Si на коррозионную стойкость (МКК и РСК) листов и плит из сплава 1370 системы Al–Mg–Si–Cu–Zn, а также режимов НТМО и старения на ширину ЗСВ.

Методика проведения исследования

Исследования проводили на промышленных плитах толщиной 20 мм и листах толщиной 1,2 мм из сплава 1370 с химическими составами, отличающимися по содержанию Mg и Si и содержащих ~1% (по массе) Cu (табл. 1). Листы и плиты изготавливали в промышленных условиях ОАО «КУМЗ». Исследование ЗСВ проводили на плитах состава 1, влияние соотношения Mg/Si – на плитах и листах составов 1–3.

Таблица 1

Соотношение Mg/Si в сплавах 1370 и 6056

Условный номер состава	Соотношение Mg/Si
1	0,89
2	1,22
3	1,59
Сплав 6056 [7]	0,93

НТМО плит осуществлялась по следующей технологической схеме. Горячекатаные плиты закаливали (после нагрева в воздушной электрической печи) при температурах 530 и 547°C с последующим охлаждением в холодной воде. После закалки проводили правку плит растяжением с остаточной степенью деформации $\varepsilon=2\%$, а затем холодную деформацию по двум схемам с различным видом деформации: растяжением с $\varepsilon=15\%$ и прокаткой с $\varepsilon=20\%$. Искусственное старение проводили по одно- и многоступенчатым режимам: 180°C, 10 ч (Т1); А и Б (табл. 2).

Холоднокатаные листы закаливали (после нагрева в ванне с селитрой) при температуре 530°C с последующим охлаждением в воде. После закалки проводили правку и старение по режиму 180°C, 8 ч (Т1).

Таблица 2

Режимы старения плит

Режим старения	Температура старения, °С, ступеней		
	1	2	3
Т1: 180°C, 10 ч	180	–	–
А: 180°C+T ₂ * (T ₂ <180°C)	180	T ₂	–
Б: T ₁ *+180°C+T ₃ * (T ₁ <180°C, T ₃ <180°C)	T ₁	180	T ₃

* T₁, T₂, T₃ – температуры старения на первой, второй и третьей ступенях соответственно.

Механические свойства плит определяли на круглых образцах, вырезанных поперек направления прокатки (по ГОСТ 1497). Испытания на МКК проводились (по ГОСТ 9.021) в растворе 2, на расслаивающую коррозию (РСК; ГОСТ 9.904–82) – также в растворе 2. Микроструктуру плит исследовали на шлифах, вырезанных вдоль направления прокатки по толщине, после анодного оксидирования. Размер зерна определяли вдоль направления прокатки по длине (Д) и высоте (В). Электронно-микроскопические исследования проводили на образцах, вырезанных из плиты на расстоянии 1–3 мм от катаной поверхности.

Результаты влияния различных режимов НТМО плит на ширину ЗСВ и свойства приведены в табл. 3. Микроструктура приповерхностного слоя плит приведена на рис. 1. В закаленном с температуры 530°C и правленном состоянии, т. е. без НТМО, размер зер-

на (Д×В) составляет (105–125)×(30–40) мкм. В случае применения НТМО с деформацией растяжением с $\epsilon=15\%$ размер зерна – (170–190)×(30–40) мкм, в случае деформации прокаткой с $\epsilon=20\%$ – (120–140)×(15–25) мкм. При закалке плиты с температуры 547°С и с последующим растяжением с $\epsilon=15\%$ размер зерна составляет (150–170)×(30–40) мкм, в случае деформации прокаткой с $\epsilon=20\%$ – (140–160)×(20–30) мкм. Повышенные прочностные свойства плит с НТМО связаны с увеличением плотности и уменьшением размера упрочняющих выделений β' - и Q_1' -фаз в теле и по границам зерна [8]. С повышением температуры нагрева под закалку с 530 до 547°С прочностные свойства также увеличиваются, что связано с увеличением степени пересыщения твердого раствора.

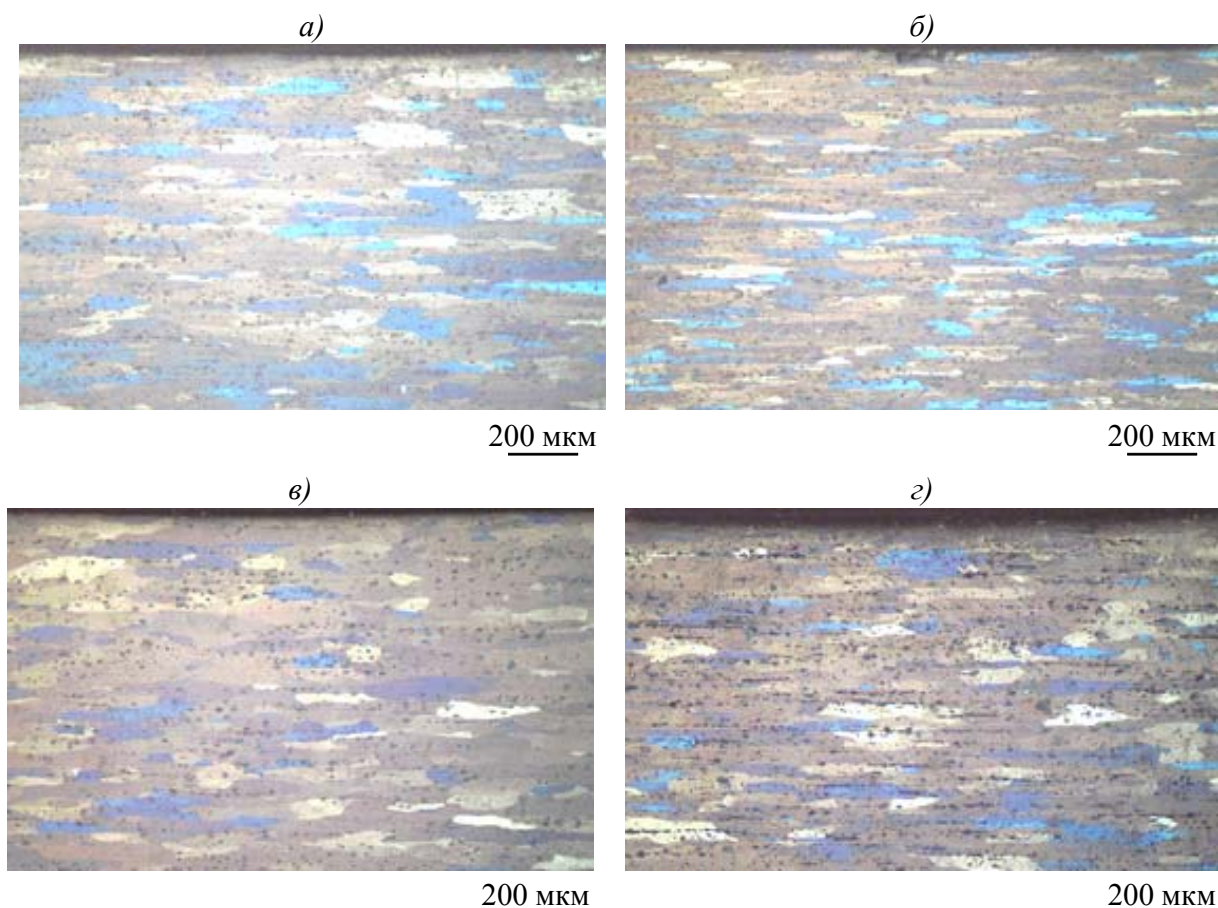


Рис. 1. Микроструктура плит из сплава 1370 с НТМО:
а – закалка с 530°С+растяжение с $\epsilon=15\%$; *б* – закалка с 530°С+прокатка с $\epsilon=20\%$; *в* – закалка с 547°С+растяжение с $\epsilon=15\%$; *з* – закалка с 547°С+прокатка с $\epsilon=20\%$

Таблица 3

Влияние вида деформации между закалкой и старением на механические и коррозионные свойства плит из сплава 1370

Свойства	Значения свойств при температуре закалки, °С				
	без НТМО (исходное состояние)	530		547	
		растяжение ($\epsilon=15\%$)	прокатка ($\epsilon=20\%$)	растяжение ($\epsilon=15\%$)	прокатка ($\epsilon=20\%$)
σ_b , МПа	410	430	445	445	450
$\sigma_{0,2}$, МПа	385	400	425	420	430
δ , %	12,5	11	12	10,5	8
Глубина МКК*, мм	0,20/0,14	0,13/0,07	0,08/0,04	0,08/0,04	0,05/0,04
РСК*, балл	3/3	3/4	3/3	3/4	3/4
Ширина ЗСВ, нм	–	100	60	45	30

* Катаная/фрезерованная на 1/2 толщины поверхность плиты.

При исследовании влияния НТМО на склонность плит к МКК было выявлено, что глубина поражений МКК уменьшается вместе с шириной ЗСВ. На катаной поверхности наибольшей глубиной поражений МКК (0,13 мм) обладают плиты с шириной ЗСВ 100 нм, наименьшей (0,05 мм) – с шириной ЗСВ 30 нм (рис. 2 и 3). Влияние ширины ЗСВ на расслаивающую коррозию плит при исследованных режимах НТМО не выявлено.

Для оценки влияния режима старения на глубину поражений МКК, расслаивающую коррозию и ширину ЗСВ использовали образцы, изготовленные из плиты, закаленной с температуры 547°C и деформированной растяжением с $\epsilon=15\%$. В случае применения многоступенчатого режима старения глубина поражений МКК уменьшается по сравнению с одноступенчатым (табл. 4). Ширина ЗСВ при применении многоступенчатого режима старения также уменьшается по сравнению с одноступенчатым.

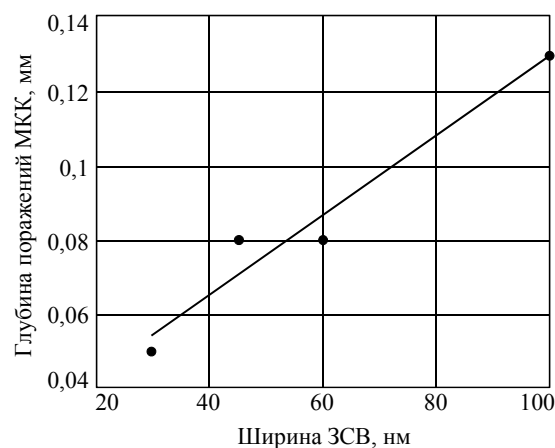


Рис. 2. Влияние ширины ЗСВ на глубину поражений МКК катаной поверхности плиты с НТМО из сплава 1370

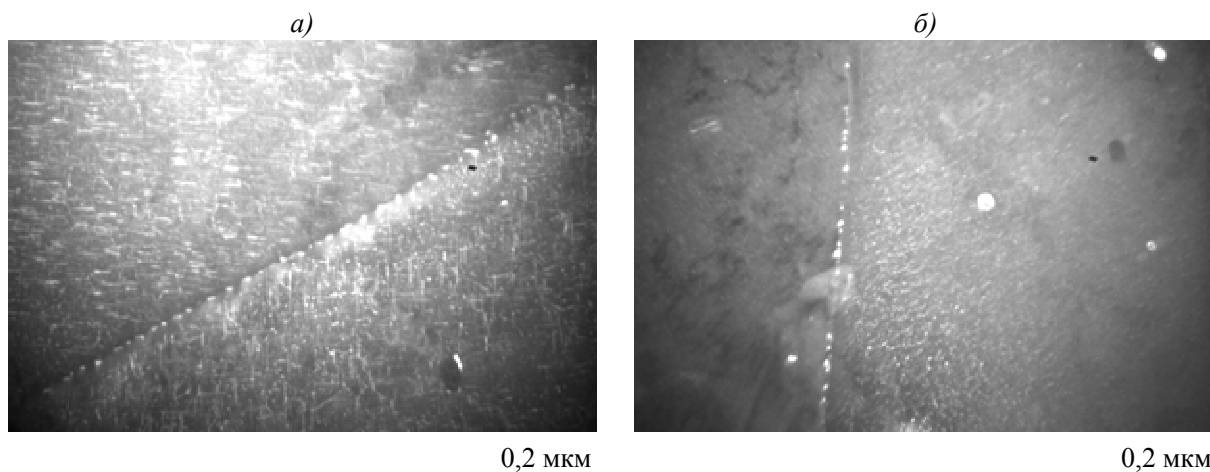


Рис. 3. Темнопольное изображение границы зерна в плите из сплава 1370 с выделениями $\beta'+Q_1'$ -фаз в образце с шириной ЗСВ: 30 (а) и 100 нм (б)

Таблица 4

Механические и коррозионные свойства, ширина ЗСВ в плите из сплава 1370 с НТМО (деформация растяжением с $\epsilon=15\%$), состаренной по различным режимам

Режим старения (см. табл. 2)	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ , %	Глубина МКК*, мм	РСК*, балл	Ширина ЗСВ, нм
	МПа					
Одноступенчатый Т1 (180°C, 10 ч)	445	420	10,5	0,08/0,04	3/4	45
Двухступенчатый А	440	420	11,0	0,07/0,04	3/4	40
Трехступенчатый Б	440	420	8,0	0,05/Нет	3/4	35

* Катаная/фрезерованная на $\frac{1}{2}$ толщины поверхность плиты.

В результате многоступенчатого искусственного старения по сравнению с одноступенчатым увеличивается плотность и дисперсность упрочняющих выделений β' - и Q_1' -фаз в теле зерна (рис. 4). НТМО плит из сплава 1370, включающая многоступенча-

тый режим старения (Б), обеспечивает глубину МКК не более 0,10 мм при сохранении высоких прочностных характеристик ($\sigma_B=440$ МПа, $\sigma_{0,2}=420$ МПа, $\delta=8,0\%$ при глубине МКК: 0,05 мм) [9]. При исследованных режимах старения ширина ЗСВ практически не влияет на склонность к расслаивающей коррозии плит.

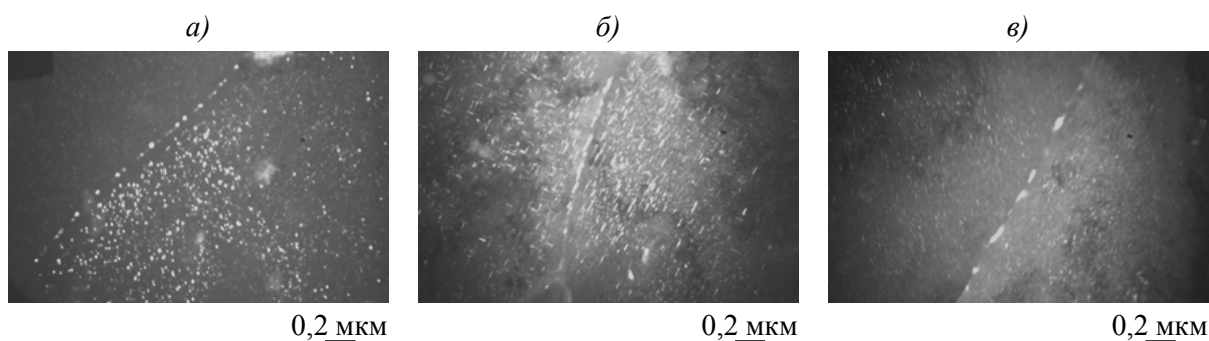


Рис. 4. Участки границ зерен в плитах из сплава 1370 с НТМО, состаренных по режимам (см. табл. 2) Т1 (а), А (б) и Б (в)

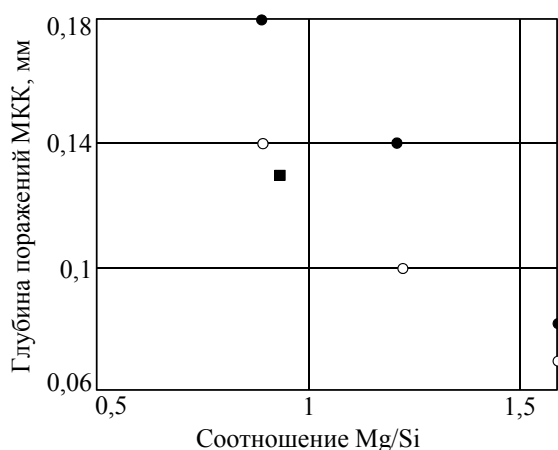


Рис. 5. Влияние соотношения Mg/Si в сплаве 1370 на глубину поражений МКК листов (●) и плит (○) в состоянии Т1 (■ – листы из сплава 6056-T6)

С увеличением соотношения Mg/Si в интервале 0,89–1,59 в катаных полуфабрикатах из сплава 1370 выявлено уменьшение глубины поражений МКК в два раза.

Многоступенчатое старение уменьшает склонность к МКК и обеспечивает высокие прочностные свойства.

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. 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.

конф. «Современные проблемы металловедения сплавов цветных металлов». М.: МИСиС. 2009. 462 с.

4. 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 USA). Trans Tech Publications Ltd. 2000. V. 1. P. 1613–1618.
5. Структура и механические свойства металлов и сплавов. Свердловск: Наука. 1975. С. 77–89.
6. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. Т. 1. М.: Metallurgia. 1968. С. 329–343.
7. Guillaumin V., Mankowski G. Corrosion behaviour of 2024 T351 and 6056 T6 aluminium alloys in chloride solution /Proceedings of 6-th International Conference on Aluminium Alloys (Japan). The Japan Institute of Light Metals. 1998. V. 3. P. 1663–1668.
8. Alekseev A., Ermolova M., Kolobnev N. Diffusive paths in 6013 (AD37) alloys under a single and double ageing /Proceedings of 8-th International Conference on Aluminium Alloys (UK). Trans Tech Publications Ltd. 2002. V. 2. P. 1181–1186.
9. Kolobnev N.I., Makhsidov V.V., Samokhvalov S.V., Sbitneva S.V., Popov V.I., Kurs M.G. An Effect of Deformation After Quenching and Heat Treatment on Mechanical and Corrosion Properties of Al–Mg–Si–Cu–Zn Alloy /Proceedings of 12-th International Conference on Aluminium Alloys (Japan). The Japan Institute of Light Metals. 2010. P. 1113–1116.

REFERENCES LIST

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. Mahsidov V.V., Samokhvalov S.V., Kolobnev N.I., Popov V.I., Savenok M.G. Vliyanie deformacii posle zakalki i rezhimov starenija na sklonnost' k mezhkristallitnoj korrozii spлавov sistemy Al–Mg–Si–Cu [Effect of deformation after quenching and aging regimes susceptibility to intergranular corrosion of alloys of the Al–Mg–Si–Cu] /Sb. nauch. trudov mezhdunarodnoj nauch.-tehnich. konf. «Sovremennye problemy metallovedeniya spлавov cvetnyh metallov». М.: МИСиС. 2009. 462 с.
4. 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 USA). Trans Tech Publications Ltd. 2000. V. 1. P. 1613–1618.
5. Структура и механические свойства металлов и сплавов [Structure and mechanical properties of metals and alloys]. Свердловск: Наука. 1975. С. 77–89.
6. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов [Thermomechanical processing of metals and alloys]. Т. 1. М.: Metallurgia. 1968. С. 329–343.
7. Guillaumin V., Mankowski G. Corrosion behaviour of 2024 T351 and 6056 T6 aluminium alloys in chloride solution /Proceedings of 6-th International Conference on Aluminium Alloys (Japan). The Japan Institute of Light Metals. 1998. V. 3. P. 1663–1668.
8. Alekseev A., Ermolova M., Kolobnev N. Diffusive paths in 6013 (AD37) alloys under a single and double ageing /Proceedings of 8-th International Conference on Aluminium Alloys (UK). Trans Tech Publications Ltd. 2002. V. 2. P. 1181–1186.
9. Kolobnev N.I., Makhsidov V.V., Samokhvalov S.V., Sbitneva S.V., Popov V.I., Kurs M.G. An Effect of Deformation After Quenching and Heat Treatment on Mechanical and Corrosion Properties of Al–Mg–Si–Cu–Zn Alloy /Proceedings of 12-th International Conference on Aluminium Alloys (Japan). The Japan Institute of Light Metals. 2010. P. 1113–1116.