

УДК 669.018.95

АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ Ti-TiAl₃Краснов Е.И.^{*}, Штейнберг А.С.^{**}, Серпова В.М.^{*}, Шавнев А.А.^{*}, Жабин А.Н.^{*}^{*} ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», г. Москва, Россия^{**} ФГБУН Институт химической физики им.Н.Н.Семенова РАН, г. Москва, Россия**АННОТАЦИЯ**

Проведен обзор подготовки поверхности алюминиевых и титановых фольг, рассмотрены причины газовыделения и возможности дегазации в процессе подготовки к синтезу интерметаллидов. Рассмотрена очистка поверхностей металлов перед диффузионной сваркой, наиболее близкой к технологии получения слоистых композиционных материалов. Рассмотрены способы и ряд методик предварительной обработки поверхностей, направленных на очистку поверхностей и уменьшение газосодержания. Представлены данные по эффективности дополнительной обработки алюминиевых и титановых фольг. Рассмотрена проблема уменьшения газосодержания в исходных фольгах титана и алюминия. Определены значения коэффициента диффузии при дегазации алюминиевых и титановых фольг, рассмотрены причины газовыделения и возможности дегазации. Опираясь на среднее значение коэффициента диффузии, рассчитана продолжительность времени диффузии титана в слой алюминия. Оценена эффективность десорбции водорода на стадии предварительной дегазации алюминиевой фольги. Показано, что при плотном контакте титана с алюминиевой фольгой, имеющей толщину $d=150$ мкм, времени порядка $t=20$ минут будет достаточно, чтобы концентрация титана, диффундирующего в алюминий, была практически постоянна по его толщине. Показано, что если давление в вакуумной печи будет существенно ниже соответствующей температуре опыта равновесной упругости водорода, сорбированного на поверхности алюминия, время его диффузии из объема алюминиевого слоя будет существенно меньше оцененного выше времени диффузии титана. Предложены рекомендации по увеличению параметров диффузионной кинетики синтеза алюминиевых и титановых фольг, обеспечению снижения пористости получаемых образцов и, соответственно, увеличению прочности.

Ключевые слова: слоистый композиционный материал; титан; алюминий; интерметаллид; поверхности фольговых заготовок; дегазация; диффузия

ASPECTS OF THE FORMATION OF LAYERED COMPOSITES OF Ti-TiAl₃Krasnov E.I.^{*}, Shteinberg A.S.^{**}, Serpova V.M.^{*}, Shavnev A.A.^{*}, Zhabin A.N.^{*}^{*} Federal State Unitary Enterprise "All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials", Moscow, Russia^{**} N.N. Semenov Institute of Chemical Physics, RAS, Moscow, Russia**ABSTRACT**

A review of preparation of aluminum and titanium foils surface is presented; the causes of gas emission and degassing possibilities in preparation for synthesis of intermetallic

compounds are examined. We consider treatment of metal surfaces prior to diffusion bonding, which is the closest to the technology of laminated composite materials preparation. Methods and a number of pre-processing surfaces techniques are given, to be intended for cleaning surfaces and reducing gas content. Data on efficiency of additional aluminum and titanium foil processing are presented. Problem is under consideration of reducing the gas content in original foils of titanium and aluminum. Values of the diffusion coefficient of degassing aluminum and titanium foils are defined, the reasons of gassing and decontamination capabilities examined. Based on the average value of diffusion coefficient, the time length of titanium diffusion in aluminum layer is calculated. Efficiency of hydrogen desorption at a stage of preliminary aluminum foil degassing is estimated. It is shown that, in case of close contact titanium with aluminum foil with its thickness of $d = 150$ microns, the time about $t = 20$ minutes is sufficient that the concentration of titanium diffused in aluminum would become constant over its thickness. It is shown that if the pressure in vacuum furnace would be greatly lower than that corresponding to equilibrium temperature of elasticity for hydrogen adsorbed on the aluminum surface, time for its diffusion from the aluminum layer will be significantly less than the diffusion time for titanium estimated above. Recommendations are given to increase diffusion kinetics parameters while synthesis of aluminum and titanium foils and reducing porosity of the samples obtained, that leads correspondingly to the increase in their strength.

Keywords: layered composite material; titanium; aluminum; intermetallic; surface foil blanks; degassing; diffusion

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной техники невозможно без применения материалов, обладающих особыми физическими, механическими, технологическими и эксплуатационными свойствами как, например, слоистые композиционные материалы (СКМ). Они представляют собой многослойные наборы, содержащие чередующиеся слои металла (М) и неметалла (НМ) – интерметаллида (ИМ) или керамики (К). В связи с тем, что физико-механические свойства компонентов обеих пар СКМ (М-ИМ или М-К) существенно различны, для получения высокопрочного СКМ необходимы специальные приемы. Речь идет и об изучении диффузии, кинетики реакций синтеза ИМ (или К), и о необходимости исследования и учета закономерностей сварки ИМ и К с металлами, в частности с титаном.

Исследования, выполненные в Японии и США [1,2], показали, что класс СКМ является особенно перспективным, в частности состав Ti-TiAl₃.

Одной из важных проблем получения слоистых композиционных материалов (СКМ) из алюминиевых и титановых фольг является их предварительная обработка, главными стадиями которой являются [3-8]:

- очистка поверхностей от загрязнений, прежде всего органических;
- устранение газов, адсорбированных на поверхности и растворенных в материалах фольг.

Очистка фольг исследовалась для подготовки алюминиевых и титановых фольг для пайки и сварки [9-20]. С поверхностей загрязнения удаляют с помощью органических и хлорированных растворителей, синтетическими средствами и щелочными растворами. Ускорение процесса чистки и повышение качества обезжиривания эффективно осуществляются с использованием ультразвука.

Проблема уменьшения газосодержания в исходных фольгах титана и алюминия подробно изучалась в работах по пайке и сварке этих металлов [9-20]. Отмечалось, что выделение газа, преимущественно адсорбированного

на паяемых поверхностях Al и Ti, и поступление его в объем расплавленного припоя приводило к появлению пор в шве и снижению прочности паяного соединения. Для, слоистых композиционных материалов, при относительно больших площадях реагирования, выделение газа снижает прочность материала и угрожает целостности композита.

1. ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ К ИССЛЕДОВАНИЮ

В качестве исходных компонентов, для формирования СКМ, использовали титановую фольгу марки VT1-0 толщиной 100 мкм и алюминиевую фольгу А5М толщиной 50 мкм.

С поверхности фольги загрязнения удаляли с помощью органических и хлорированных растворителей, синтетическими средствами и щелочными растворами. Ускорение процесса чистки и повышение качества обезжиривания эффективно осуществляли с использованием ультразвука.

Удаление газов предусматривается в первой стадии процесса перед собственно синтезом СКМ, когда в достаточно глубоком вакууме происходит нагрев ненагруженной многослойной сборки. Вакуумная печь – Naberthetm VHT 100/МО.

Фазовый состав СКМ контролировали рентгенофазовым методом по ММ 1.595-17-222 на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Были испытаны ряд методов предварительной обработки поверхностей, направленных на очистку поверхностей и уменьшение газосодержания [7]. Рассмотрим некоторые из этих методов с учетом технологии изготовления СКМ.

Очистка поверхностей обоих металлов перед диффузионной сваркой, наиболее близкой к технологии СКМ, включает следующие стадии: 1 – механическая очистка; 2 – обдувка сжатым воздухом; 3 – обезжиривание органическими растворителями, а в случае необходимости и химическое обезжиривание; 4 – промывка в горячей воде; 5 – промывка в холодной воде; 6 – сушка.

Этими операциями целесообразно чистить фольги и перед сборкой СКМ до помещения их в вакуумную печь. В случае, когда поверхности являются чистыми, остается вторая причина газовыделения при их нагреве – адсорбированные газы, преимущественно содержащиеся в тонком поверхностном слое металлов. Удаление этих газов предусматривается в первой стадии процесса перед собственно синтезом СКМ, когда в вакууме происходит нагрев несжатой многослойной сборки. Но и до начала этой стадии, т.е. после указанной выше очистки, специальная дополнительная обработка фольг может снизить содержание сорбированных газов.

В таблице 1 представлены данные [7] по эффективности такого рода дополнительной обработки поверхности алюминия. По данным [7] для различных образцов технического титана (с высоким и низким содержанием С, Н, N, O) значения коэффициента диффузии отличаются между собой незначительно и равны соответственно при температурах.

Таблица 1.

Содержание газов на поверхности алюминия.

Способ подготовки поверхности	Количество газов, выделившихся с 1 см ² поверхности образца (см ³ · 10 ⁻³)
Щелочное травление с осветлением	2,63–3,75
Щелочное травление с осветлением и пассивированием	1,80
Зачистка щеткой за 10 суток до анализа	3,21
Травление в растворе Н ₃ РO ₄ (250 г/л), К ₂ Сr ₂ O ₇ (0,01-0,08 г/л)	0,80
Зачистка щеткой перед анализом	0,70
Щелочное травление с осветлением, хранение в течение 1 суток	1,84
Травление в концентрированной Н ₃ РO ₄ при 60°С, 60 сек; фиксирование в концентрированной Н ₃ РO ₄ при 20°С, 5 сек; осветление в ННО ₃	0,43

В разделе монографии [6], посвященной сварке титана алюминием сообщается, что для сварки при температурных режимах выше температуры плавления алюминия поверхность титановых деталей, которые нельзя было шабровать, подвергали травлению в растворе, содержащем соляную кислоту (250 мл/л) и фтористый натрий (45г/л). С учетом этих данных при тщательной промывке и сушке поверхностей обеих фольг, с последующей их дегазацией, т.е. выдерживанием несжатых СКМ при температурах порядка 640°С в вакууме (желательно – не ниже 10⁻⁵ мбар) можно увеличить параметры диффузионной кинетики синтеза СКМ, обеспечить снижение пористости получаемых образцов и, соответственно, увеличение прочности.

На рис.1 представлены данные РФА образцов СКМ (50x50 мм), полученных при T=620°С и T=660°С, когда дегазация специально не проводилась и происходила лишь на протяжении непродолжительной стадии прогрева.

Толщина исходных фольг: Al-50 мкм; Ti-100 мкм. Общее количество слоёв составило 29, из них 15 слоёв Ti и 14 слоёв Al. Режим при проведении синтеза был следующим: T=660°С, τ=2ч, вакуум 10⁻⁵ мбар., давление 60 МПа.

В процессе нагрева печи до 580°С вакуум стабильно наблюдался на уровне 10⁻⁵ мбар, по достижению 630°С он постепенно падал до 9·10⁻⁴ мбар, что указывает на процесс дегазации. После достижения температуры 660°С и времени выдержки 2ч, вакуум восстановился до 10⁻⁵ мбар.

Полученные образцы не имели внешних изъянов – трещин, расслоений, каверн и т.д.

Согласно диффузионной кинетике, для получения однородного слоя интерметаллидов, необходимо, чтобы продолжительность диффузии тугоплавкого компонента (Ti) в объем легкоплавкого (Al) была существенно короче времени термостатирования (синтеза) [4,6]. Если синтез осуществляют вблизи температуры плавления легкоплавкого компонента, считается, что коэффициент твердофазной диффузии тугоплавкого компонента не может быть ниже, чем на один – два порядка по сравнению с коэффициентом диффузии растворенных веществ в любых жидкостях, имеющих порядок

$D_L=10^{-5}-10^{-6}$ см²/сек. Данные по диффузии металлов в твердый алюминий в литературе имеются [5,6], хотя результаты по титану найти не удалось. Однако представляет интерес осуществление соответствующих расчетов для тех металлов, которые находятся в таблице Менделеева достаточно близко к титану. Результаты этих расчетов приведены ниже.

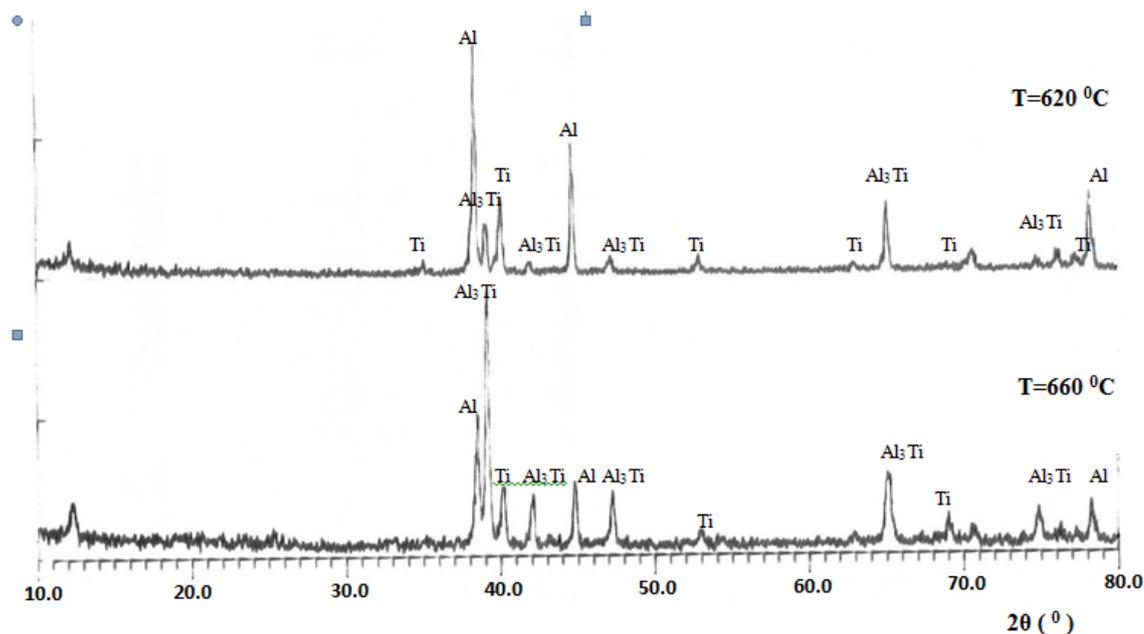


Рис.1. Рентгенограмма полученного слоистого композиционного материала после печного синтеза.

Уравнение для коэффициента диффузии D

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (1)$$

где D_0 – предэкспонент (см²/сек), E – энергия активации (кал/моль), $R=1.99$ кал/моль·К – универсальная газовая постоянная, T – температура (К).

В таблице 2 приведены данные для нескольких металлов, диффундирующих в алюминий и величины соответствующих коэффициентов диффузии D при температуре $T=640^\circ\text{C}=913\text{K}$.

Таблица 2.

Металл	D_0 , см ² /сек	E , кал/моль	D , см ² /сек
Ga	0,49	29240	$5 \cdot 10^{-8}$
Ge	0,48	28980	$6 \cdot 10^{-8}$
Al	1,71	34000	$2 \cdot 10^{-8}$
Ag	0,12	27830	$3 \cdot 10^{-8}$
Cr	464,00	41740	$6 \cdot 10^{-8}$

Приведенные данные свидетельствуют, что при $T=640^\circ\text{C}$, т.е. вблизи температуры плавления алюминия значения констант диффузии этих металлов в твердом алюминии близки между собой и лежат в диапазоне $D=(2-6) \cdot 10^{-8}$ см²/сек.

Опираясь на среднее значение коэффициента диффузии $D=4 \cdot 10^{-8}$ см²/сек, оценим продолжительность t времени диффузии титана в слой алюминия

толщиной d . Из теории нестационарной диффузии известно, что разнице в 1% между величинами концентрации диффундирующего агента на границе слоя толщиной d и в середине этого слоя соответствует величина безразмерного диффузионного критерия Фурье $Fo=1$

$$F_o = \frac{4Dt}{d^2} = 1, \text{ т.е. } t = \frac{d^2}{4D} \quad (2)$$

Подставляя в (2) значения $D=4 \cdot 10^{-8}$ см²/сек и $d=150$ мкм=0.015 см, получим $t=1125$ сек=19 мин.

Этот результат свидетельствует о том, что при плотном контакте титана с алюминиевой фольгой, имеющей толщину $d=150$ мкм, времени порядка $t=20$ минут будет достаточно, чтобы концентрация титана, диффундирующего в алюминий, была практически постоянна по его толщине.

Не менее важным является аналогичный вывод и для оценки эффективности десорбции водорода на стадии предварительной дегазации алюминиевой фольги. Диффузия водорода всегда много быстрее диффузии более тяжелых атомов. В этой связи, если давление в вакуумной печи будет существенно ниже соответствующей температуре опыта равновесной упругости водорода, сорбированного на поверхности алюминия, время его диффузии из объема алюминиевого слоя будет существенно меньше оцененного выше времени диффузии титана.

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведен обзор и анализ подготовки поверхностей алюминиевых и титановых фольг, рассмотрены причины газовыделения и возможности дегазации.

Определены значения коэффициента диффузии при дегазации.

Показано, что при плотном контакте титана с алюминиевой фольгой, имеющей толщину $d=150$ мкм, времени порядка $t=20$ минут будет достаточно, чтобы концентрация титана, диффундирующего в алюминий, была практически постоянна по его толщине.

Не менее важным является аналогичный вывод и для оценки эффективности десорбции водорода на стадии предварительной дегазации алюминиевой фольги. Диффузия водорода всегда много быстрее диффузии более тяжелых атомов. В этой связи, если давление в вакуумной печи будет существенно ниже соответствующей температуре опыта равновесной упругости водорода, сорбированного на поверхности алюминия, время его диффузии из объема алюминиевого слоя будет существенно меньше оцененного выше времени диффузии титана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vecchio K.S. *Synthetic multifunctional metallic-intermetallic laminate composites* // J. of The Minerals, Metals & Materials Society. – 2005. – Vol.57. – Iss.3. – P.25-31.
2. *Process for metallic/intermetallic composite laminate materia and materials so prodused especially for use in lightweight armor*. Pat. 6357332 US; Publ. 2002.
3. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. *Исследование мелкодисперсных порошков припоев для диффузионной*

- вакуумной пайки, полученных методом атомизации расплава* // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2011. – №SP2. – С.79-87.
4. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. *Сварка и пайка в авиакосмической промышленности* / Всеросс. науч.-практич. конф. «Сварка и безопасность». Сборник материалов. – Якутск: Офсет, 2012. – Т.1. – С.21-30.
 5. Messler R. *Joining of materials and structures*. – Amsterdam - New York - Tokyo: Elsevier, 2004. – 786 p.
 6. Лашко С., Лашко Р. *Пайка металлов*. – М.: Машиностроение, 1988. – 374 с.
 7. Никитинский М. *Пайка алюминия и его сплавов*. – М.: Машиностроение, 1983. – 190 с.
 8. *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов*. – Киев: Наукова думка, 1986. – 238 с.
 9. Клочков Г.Г., Грушко О.Е., Попов В.И., Овчинников В.В., Шамрай В.Ф. *Структура, технологические свойства и свариваемость листов из сплава В-1341 системы Al-Mg-Si* // Авиационные материалы и технологии. – 2011. – №1. – С.3-8.
 10. Шмотин Ю.Н., Старков Р.Ю., Данилов Д.В., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. *Новые материалы для перспективного двигателя ОАО «НПО „Сатурн”»* // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №2. – С.6-8.
 11. Ковтунов А.И., Мямин С.В. *Исследование технологических и механических свойств слоистых титано-алюминиевых композиционных материалов, полученных жидкофазным способом* // Авиационные материалы и технологии. – 2013. – №1. – С.9-13.
 12. Оглодков М.С., Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Алексеев А.А. и др. *Влияние термомеханической обработки на свойства и структуру сплава системы Al-Si-Mg-Li-Zn* // Авиационные материалы и технологии. – 2010. – №4. – С.7-12.
 13. Чирков Е.Ф. *Темп разупрочнения при нагревах – критерий оценки жаропрочности конструкционных сплавов систем Al-Si-Mg и Al-Si* // Труды ВИАМ. – 2013. – №2. – Ст.02 (viam-works.ru).
 14. Хорев А.И. *Фундаментальные и прикладные работы по конструкционным титановым сплавам и перспективные направления их развития* // Труды ВИАМ. – 2013. – №2. – Ст.04 (viam-works.ru).
 15. Лукин В.И., Иода Е.Н., Базескин А.В. и др. *Повышение надежности сварных соединений из высокопрочного алюминиево-литиевого сплава В-1461* // Сварочное производство. – 2010. – №11. – С.14-17.
 16. Лукин В.И., Иода Е.Н., Базескин А.В. и др. *Особенности формирования сварного соединения при сварке трением с перемешиванием алюминиевого сплава В-1469* // Сварочное производство. – 2012. – №6. – С.30-36.
 17. Petrovic M., Veljic D., Rakin M., Radovic N., Sedmak A., Bajic N. *Friction-stir welding of high-strength aluminium alloys and a numerical simulation of plunge stage* // Materials in technology. – 2012. – Vol.46. – N3. – P.215-221.
 18. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. *Алюминиевые деформируемые сплавы* // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №S. – С.167-182.
 19. Каблов Е.Н. *Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года* // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №S. – С.7-17.
 20. *Интерметаллидный сплав на основе титана*. Патент РФ 2405849; Опубл. 28.10.2009.

REFERENCES

1. Vecchio K.S. *Synthetic multifunctional metallic-intermetallic laminate composites*. J. of The Minerals, Metals & Materials Society, 2005, Vol.57, Iss.3, Pp.25-31.
2. *Process for metallic/intermetallic composite laminate materia and materials so prodused especially for use in lightweight armor*. US Pat. 6357332; Publ. 2002.
3. Kablov E.N., Evgenov A.G., Rilnikov V.S., Afanasiev-Khodikin A.N. *Issledovanie melkodispersnykh poroshkov pripoev dlia diffuzionnoi vakuumnoi paiki, poluchennykh metodom atomizatsii rasplava [Investigation of fine solder powders for vacuum brazing diffusion obtained by the melt atomization]*. Vestnik MGTU Baumana "Mashinostroenie", 2011, No.SP2, Pp.79-87.
4. Kablov E.N., Lukin V.I., Ospennikova O.G. *Svarka i paika v aviakosmicheskoi promyshlennosti [Welding, soldering and brazing in aerospace industry]*. Vserossiiskaia konferentsiia "Svarka i Bezopasnost". Sbornik materialov. Iakutsk: Ofset, 2012, Pp.21-30.
5. Messler R. *Joining of materials and structures*. Amsterdam-New York-Tokyo: Elsevier, 2004, 786 p.
6. Lashko S., Lashko R. *Paika metallov [Metal soldering]*. Moskva: Mashinostroenie, 1988, 374 p.
7. Nikitski M. *Paika aliuminiia i ego splavov [Brazing of aluminum and its alloys]*. Moskva: Mashinostroenie, 1983, 190 p.
8. *Metallurgii i tekhnologii svarki titana i ego splavov [Metallurgy and technology of welding of titanium and its alloys]*. Kiev: Naukova dumka, 1986, 238 p.
9. Klochkov G.G., Grushko O.E., Popov V.I., Ovchinnikov V.V., Shamrai V.Ph. *Struktura, tekhnologicheskie svoistva i svarivaemost' listov iz splava B-1341 sistemy Al-Mg-Si [Structure, processing properties and weldability of the alloy sheets B-1341 system Al-Mg-Si]*. Aviatsionnye materialy i tekhnologii, 2011, No.1, S3-8.
10. Shmotin U.N., Starkov R.u., Danilov D.V., Ospennikova O.G., Lomberg B.S. *Novye materialy dlia perspektivnogo dvigatel'ia OAO «NPO „Saturn”» [New materials for future engine of JSC "NPO" Saturn "»]*. Aviatsionnye materialy i tekhnologii, 2012, No.2, S6-8.
11. Kovtunov A.I., Miamin S.V. *Issledovanie tekhnologicheskikh i mekhanicheskikh svoistv sloistykh titano-aliuminievykh kompozitsionnykh materialov, poluchennykh zhidkofaznym sposobom [Investigation of processing and mechanical properties of titanium-aluminum layered composite material obtained by the liquid phase method]*. Aviatsionnye materialy i tekhnologii, 2013, No.1, Pp.9-13.
12. Oglodkov M.S., Khokhlatova L.B., Kolobnev N.I., Alekseev A.A. et al. *Vliianie termomekhanicheskoi obrabotki na svoistva i strukturu splava sistemy Al-Cu-Mg-Li-Zn [Effect of thermomechanical treatment on the properties and structure of the alloy system Al-Cu-Mg-Li-Zn]*. Aviatsionnye materialy i tekhnologii, 2010, No.4, Pp.7-12.
13. Chirkov E.F. *Temp razuprochneniia pri nagrevakh – kriterii otsenki zharoprochnosti konstruktsionnykh splavov sistem Al-Cu-Mg i Al-Cu [The rate of softening when heated - criterion of heat resistance of structural alloys of Al-Cu-Mg and Al-Cu]*. Trudy VIAM, 2013, No.2, St.02 (viam-works.ru).
14. Khorev A.I. *Fundamental'nye i prikladnye raboty po konstruktsionnym titanovym splavam i perspektivnye napravleniia ikh razvitiia [Fundamental and applied work on structural titanium alloys and perspective directions of development]*. Trudy VIAM, 2013, No.2, St.04 (viam-works.ru).

15. Lukin V.I., Ioda E.N., Bazeskin A.V. et al. *Povyshenie nadezhnosti svarnykh soedinenii iz vysokoprochnogo aluminievo-litievogo splava B-1461 [Increased reliability of welded joints of high-strength aluminum-lithium alloy B-1461]*. Svarochnoe proizvodstvo, 2010, No.11, Pp.14-17.
16. Lukin V.I., Ioda E.N., Bazeskin A.V. et al. *Osobennosti formirovaniia svarnogo soedineniia pri svarke treniem s peremeshivaniem aluminieвого splava V-1469 [Features of formation of the welded joint with friction welding of aluminum alloy mixing B-1469]*. Svarochnoe proizvodstvo, 2012, No.6, Pp.30-36.
17. Petrovic M., Veljic D., Rakin M., Radovic N., Sedmak A., Bajic N. *Friction-stir welding of high-strength aluminium alloys and a numerical simulation of plunge stage*. Materials in technology, 2012, Vol.46, No.3, Pp.215-221.
18. Antipov V.V., Senatorova O.G., Tkachenko E.A., Vakhromov R.O. *Aluminievye deformiruemye splavy [Aluminum wrought alloys]*. Aviatsionnye materialy i tekhnologii, 2012, No.S, Pp.167-182.
19. Kablov E.N. *Strategicheskie napravleniia razvitiia materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda [The strategic directions of development of materials and technologies for processing them for the period up to 2030]*. Aviatsionnye materialy i tekhnologii, 2012, No.S, Pp.7-17.
20. *Intermetallidnyi splav na osnove titana [Intermetallic alloys based on titanium]*. RF Patent 2405849; Publ. 28.10.2009.

Поступила в редакцию 17 марта 2014 года

Сведения об авторах:

Краснов Евгений Ильич – инж. 2-ой категории, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», г. Москва, Россия; e-mail: Jen_nov@mail.ru

Штейнберг Александр Семенович – д.ф.-м.н, гл.н.с., ФГБУН Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, г. Москва, Россия; e-mail: Shteinberg@aol.com

Серпова Виктория Михайловна – инж. 2-ой категории, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» г. Москва, Россия; e-mail: nikasvm@yandex.ru

Шавнев Андрей Александрович – к.т.н., нач.лаб., ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» г. Москва, Россия; e-mail: as151@mail.ru

Жабин Александр Николаевич – инж. 2-ой категории, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» г. Москва, Россия; e-mail: alzhabin@mail.ru