

УДК 669.715

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-34-39

*Р.О. Вахромов<sup>1</sup>, Е.А. Ткаченко<sup>1</sup>, О.И. Попова<sup>1</sup>, Т.В. Милевская<sup>1</sup>***ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТА ПРИМЕНЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1933 ДЛЯ СИЛОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ СОВРЕМЕННОЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

*Высокопрочный сплав 1933, отвечающий требованиям конструкторов по прочности, ресурсу и надежности, является одним из основных материалов для изготовления деталей силового каркаса планера (шпангоутов, лонжеронов, фитингов и т. д.) для современных перспективных самолетов (SSJ, MC-21 и др.).*

*За последние 5–10 лет в ВИАМ совместно с отечественными металлургическими заводами выполнен большой комплекс работ по усовершенствованию состава сплава 1933 (в рамках марочного состава по ОСТ1 90026 с изменениями №3, 9, 10), в том числе по снижению содержания примесей железа и кремния, с целью повышения комплекса основных служебных характеристик и прокаливаемости при закалке. Разработаны трехступенчатые режимы старения, обеспечивающие одновременное повышение прочностных характеристик при сохранении высокой коррозионной стойкости. Разработаны режимы закалки с применением в качестве охлаждающей среды водных растворов полимеров, что позволяет существенно снизить уровень остаточных закалочных напряжений в кованных полуфабрикатах и избежать поводок и коробления при механической обработке деталей из сплава 1933.*

*По оценкам экспертов в ближайшие 5–10 лет ожидается широкое освоение новых ресурсо- и энергосберегающих технологий тиксоформования как в массовом производстве индустриально развитых стран, так и в авиакосмической промышленности.*

*Ожидается, что точные штамповки из сплава 1933, изготовленные по разработанным технологиям, будут иметь преимущество перед полуфабрикатами, полученными по серийной технологии, по усталостной долговечности – не менее чем на 25% при одинаковом уровне прочностных характеристик. Будет достигнуто повышение КИМ до 65% (т. е. более чем в 3 раза) при снижении мощности оборудования, используемого для деформации, в 8–12 раз и износа штампов – в 1,5–2 раза. Снижение трудоемкости при последующей механической обработке составит не менее 50%.*

**Ключевые слова:** высокопрочный алюминиевый сплав 1933, старение, малодеформационная закалка, остаточные напряжения, тиксоформование, точные штамповки.

*High-strength alloy 1933 is one of the basic materials for manufacture of parts of the bearing frame of the airframe (ribs, spars, fittings etc.) for today's advanced aircraft (SSJ, MS-21 and others) that meets the requirements of designers for the strength, resource and reliability of structural elements.*

*For the last 5–10 years VIAM, together with domestic metallurgical works performed a large complex of works on improvement of the alloy composition of 1933 (under the brand), including decrease of the content of the impurities of iron and silicon to improve the complex of basic performance characteristics and hardenability during hardening. Developed three modes of aging, providing simultaneous increase of the strength characteristics, while maintaining the high corrosion resistance. Developed modes hardening using as a cooling water solutions of polymers, which can significantly reduce the level of residual hardening stresses in forged semi-finished products and avoid leach and distortion when machining of parts made of alloy 1933.*

*According to experts, in the next 5–10 years is expected to be broad use in mass production of industrially developed countries of technologies тиксоформования also in the aerospace industry.*

*It is expected that the precise stamping alloy 1933, made by developed-spontaneous technologies, will have the advantage before half-finished products, obtained by serial technology, fatigue durability - not less than 25%, at the same level of strength characteristics. Will increase KIM to 65% (i.e. more than in 3 times), while reducing power equipment used for deformation, 8–12 times and wear stamps in 1,5–2 times. Reducing complexity at subsequent machining reach at least 50%.*

**Keywords:** high-strength aluminum alloy 1933, aging treatment, quenching in glycol solution, residual strength, thixoforming, near-net stamping, mechanical properties, fatigue properties, fracture toughness.

<sup>1</sup>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

В современных самолетах для получения высокой весовой эффективности конструкции в сочетании с длительным ресурсом и надежностью в эксплуатации необходимо использовать сплавы с высоким уровнем прочности, вязкости разрушения, сопротивления усталости, коррозионной стойкости [1–4].

На протяжении многих лет алюминиевые высокопрочные сплавы системы Al–Zn–Mg–Cu занимают доминирующее положение в конструкциях авиакосмической техники благодаря удачному сочетанию служебных и технологических характеристик. Такими характеристиками обладает российский сплав 1933, созданный в ВИАМ [5–8]. Высокопрочный сплав 1933 предназначен для крупногабаритных кованых и прессованных полуфабрикатов применительно к деталям внутреннего силового набора – типа фитингов, шпангоутов, лонжеронов [9]. Благодаря особенностям химического состава, технологическим режимам изготовления полуфабрикатов удалось получить при прочности 480–540 МПа высокие значения вязкости разрушения ( $K_{Ic}=40\text{--}45 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ) и пониженную скорость роста трещины усталости (СРТУ:  $dI/dN=1,6\text{--}2,0 \text{ мкм/цикл}$ ) [10]. По этим показателям сплав превосходит зарубежные аналоги по применению – сплавы 7050, 7175, 7085.

В настоящее время сплав 1933 широко применяется в силовой конструкции планера самолетов ОКБ «Яковлев» (Як-130), ГП «Антонов» (Ан-140, Ан-148 и др.), ОАО «Корпорация „Иркут“», ЗАО «ГСС» (SSJ-100) и др. и планируется к применению в новом самолете МС-21 и др., так как не исчерпал своих потенциальных возможностей. Перед разработчиками стоит задача поиска новых решений в области усовершенствования состава сплава и технологий производства полуфабрикатов, отвечающих новым запросам и требованиям конструкторов и изготовителей изделий к комплексу служебных и технологических свойств.

В течение последних 5–10 лет для обеспечения улучшенного комплекса прочностных свойств, усталостных характеристик, трещиностойкости, технологичности и коррозионной стойкости основными направлениями исследований по сплаву 1933 в ВИАМ совместно с металлургическими заводами ОАО «КУМЗ» и ОАО «ВСМПО-Ависма» являются [11]:

- оптимизация состава сплава (поиск сбалансированного легирования в рамках марочного состава);
- повышение чистоты сплава по примесям Fe и Si;
- разработка новых режимов термической обработки (закалка и старение), в том числе обеспечивающих пониженный уровень остаточных закалочных напряжений.

Насущной технологической проблемой, с которой столкнулись при изготовлении деталей из крупногабаритных кованых полуфабрикатов из сплава 1933, являются поводки и коробление деталей при механической обработке на авиацион-

тельных заводах, возникающие в результате высоких остаточных закалочных напряжений.

Одним из доступных способов снижения закалочных напряжений служит снижение скорости охлаждения при закалке, что достигается при использовании в качестве охлаждающей среды горячей воды или раствора полимера. Очевидно, что использование замедленного охлаждения при закалке лимитируется прокаливаемостью сплава, от которой зависит однородность свойств по толщине полуфабриката.

Для поковок из сплава 1933 допустимая толщина при закалке ограничена 80 мм. При большей толщине полуфабрикатов закалку проводят после предварительной механической обработки деталей на самолетостроительном заводе. Это приводит к увеличению трудоемкости изготовления деталей в самолетостроительном производстве, а также материалоемкости за счет дополнительных технологических припусков для проведения контрольных испытаний в случае поставки полуфабрикатов без термической обработки.

Увеличение номенклатуры массивных полуфабрикатов из сплава 1933, поставляемых в термообработанном состоянии, до толщины 150 мм расширяет возможности и для использования непосредственно на металлургическом заводе другого способа снижения остаточных закалочных напряжений – правки сжатием (поковки и штамповки) или растяжением (прессованные массивные полосы).

С целью увеличения прокаливаемости сплава в ВИАМ совместно с ОАО «КУМЗ» проведена работа по корректировке химического состава и разработаны новые режимы термической обработки.

Благодаря проведенным исследованиям по поиску сбалансированного состава высокопрочного кованного сплава 1933 в рамках марочного состава выбрано оптимальное соотношение  $Zn:Mg \geq 4,1$  (в сплаве 1933 соотношение  $Zn:Mg$  может изменяться от 2,9 до 4,6). Исследование промышленных поковок и штамповок толщиной 150 мм показало, что сплав с оптимальным соотношением цинка к магнию обеспечивает повышенные показатели вязкости разрушения, долговечности при усталостных испытаниях на изготовленных в производственных условиях ОАО «КУМЗ» массивных поковках и штамповках (табл. 1), причем проведенные исследования подтвердили, что полуфабрикаты из сплава 1933 сбалансированного состава обладают повышенной прокаливаемостью: практически отсутствует снижение свойств в центральной зоне поковок толщиной до 150 мм.

Данные зарубежных и отечественных исследований свидетельствуют, что одним из перспективных направлений работ по улучшению комплекса прочностных и ресурсных характеристик высокопрочных алюминиевых сплавов является поиск

новых режимов термической обработки, включающих многоступенчатые режимы старения [12–14]. Выявлено два основных направления разработок, позволяющих повысить прочностные свойства, вязкость разрушения и усталостные характеристики в деформированных полуфабрикатах из сплава 1933:

– за счет применения многоступенчатой гомогенизации в сочетании с формированием в процессе горячей деформации оптимальной зеренной и фазовой структуры;

– за счет применения многоступенчатых режимов старения.

Для улучшения комплекса прочностных характеристик, трещиностойкости и ресурса при пониженном уровне остаточных закалочных напряжений, в последние 5 лет разработаны новые режимы термической обработки кованных и прессованных полуфабрикатов из сплава 1933:

– режим T123 – закалка кованных полуфабрикатов в растворе полимера+старение по трехступенчатому режиму;

– режимы T2П, T3П – закалка кованных полуфабрикатов в растворе полимера+старение по двухступенчатым режимам T2 и T3;

– режим T122 – правка растяжением прессованных полуфабрикатов в свежезакаленном состоянии+старение по трехступенчатому режиму.

Прямые измерения показали, что остаточные напряжения при закалке в горячей воде или растворе полимера снижаются в 1,5–3 раза (со 180 МПа после закалки в холодной воде).

Как следует из данных табл. 2, полуфабрикаты из сплава 1933, обработанные по новым режимам, по уровню характеристик вязкости разрушения и трещиностойкости превосходят аналогичные полуфабрикаты из нового сплава компании «Алкоа» – 7085-T7452, широко примененного в силовой конструкции самолета А-380.

Анализ научно-технической информации за последние 2–3 года свидетельствует, что одним из основных способов улучшения структуры и комплекса эксплуатационных свойств изделий из высокопрочных сплавов является ограничение содержания интерметаллидообразующих элементов – железа, титана, циркония, кремния и др., а также экологически вредных элементов, таких как бериллий, по сравнению с содержанием этих легирующих добавок или примесей в серийных сплавах системы Al–Zn–Mg–Cu, в которых содержится до 0,15–0,25% железа, до 0,1% кремния, до 0,06–0,1% титана, что связано в основном с обеспечением требуемой технологичности при литье слитков [6–9]. Снижение содержания железа (<0,05%) и кремния (<0,04%) позволяет получить высокий уровень характеристик вязкости разрушения ( $K_{Ic}$ ), пластичности (особенно в высотном направлении) и усталостной долговечности (см. рисунок, табл. 3).

В химическом составе многих применяемых в

силовой конструкции планера современных самолетов высокопрочных сплавов с целью защиты от образования оксидных плен при литье слитков в качестве раскислителя присутствует бериллий (0,0001–0,02%), который оказывает вредное воздействие на здоровье человека. В настоящее время большое внимание уделяется вопросам экологической безопасности, и во всем мире вводятся ограничения на применение экологически вредных веществ.

Вместе с тем благодаря использованию нового литейного оборудования, оснащенного приборами автоматического регулирования процессов литья слитков, применению эффективных приборов и устройств для внепечного рафинирования расплава от оксидных плен и газовых включений, разработке новых модификаторов литой структуры стало возможным отливать слитки из высокопрочных сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu, в которых содержание железа, кремния, титана, бериллия существенно ниже, чем в серийных сплавах [15], что позволяет заметно повысить относительное удлинение, вязкость разрушения, характеристики трещиностойкости и усталостной долговечности в деформированных полуфабрикатах из этих сплавов.

Алюминиевые сплавы в ближайшие десятилетия будут применяться в самых ответственных направлениях современной техники – авиакосмических летательных аппаратах, автомобильном и железнодорожном транспорте, атомной энергетике.

Разработка и создание принципиально новых конструкций авиакосмической техники инициирует разработку новых и усовершенствование существующих высокопрочных алюминиевых сплавов и режимов их термической обработки. Однако реализация имеющегося потенциала по химическому составу (легированию основными компонентами и малыми добавками), формированию оптимальной микроструктуры во взаимосвязи с оптимальным комплексом основных свойств возможно при тесном взаимодействии специалистов-разработчиков сплавов и специалистов-технологов с тем, чтобы правильно выбрать и жестко контролировать технологические процессы производства полуфабрикатов и конструкций.

В последнее десятилетие учеными и исследователями как в России, так и за рубежом разрабатываются технологии получения точных заготовок для сложнопрофильных деталей (типа шпангоутов) методом тиксоштамповки, что позволяет повысить однородность деформации, размерную точность изделий и коэффициент использования металла, а также обеспечивает снижение усилий деформирования при одновременном улучшении достигаемого комплекса служебных и технологических свойств, особенно прочности, пластичности и усталостной долговечности [16–19].

В настоящее время Германия, США и Япония широко применяют тиксотехнологии для получе-

Таблица 1

Уровень свойств полуфабрикатов из сплава 1933 при различном соотношении цинка к магнию

Полуфабрикат (состояние)	Механические свойства					Коррозионные свойства		
	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$ , %	$KCU_{0,2}$ , кДж/м <sup>2</sup>	$K_{1c}$ , МПа $\sqrt{m}$	РСК, балл	МКК, мм	$\sigma_{кр}$ , МПа
	МПа							
Поковка* (Т2)	510/500	480/475	13,5/10	125/85	42,2/35,8	3/4	≤(0,15/0,2)	≥(170/170)
Штамповка (Т3)	483–492	447–464	12–15	208–216	40,5–43,7	3	0–0,07	≥280

\* В числителе – сбалансированный состав (Zn:Mg≥4,1), в знаменателе – средний марочный состав (Zn:Mg=3,4).

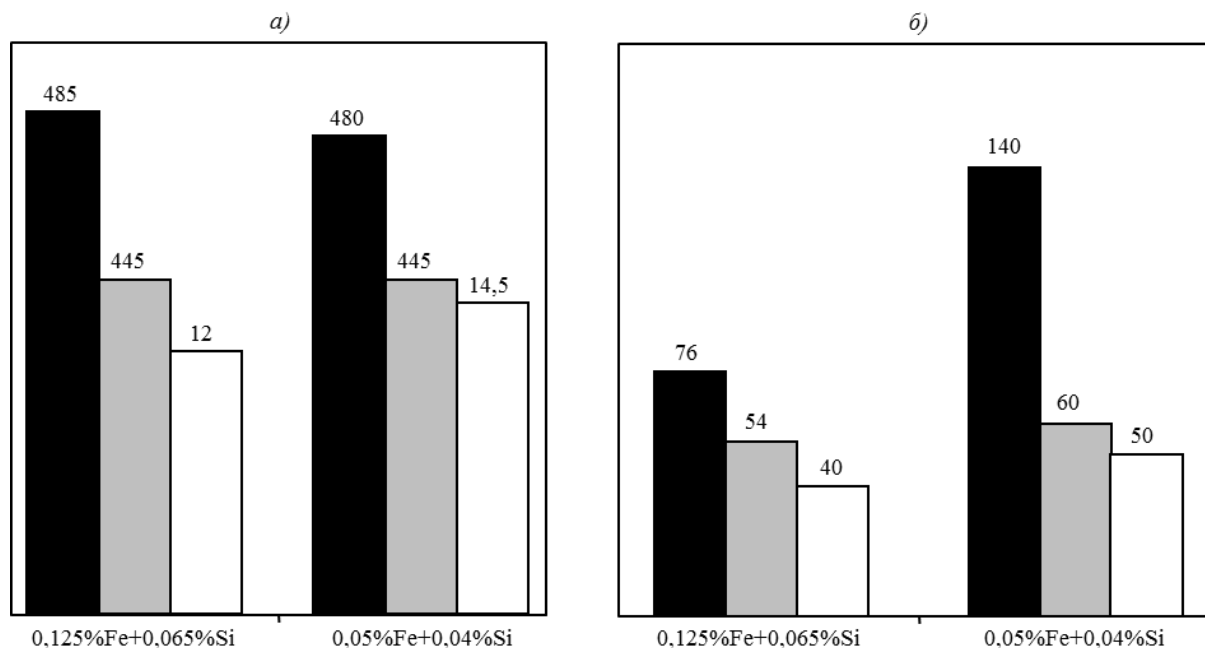
Таблица 2

Основные характеристики кованных и прессованных полуфабрикатов из сплава 1933 с пониженным уровнем остаточных напряжений в состояниях Т122 (правка растяжением в свежезакаленном состоянии) и Т123 (закалка в растворе полимера)

Характеристика	Значения характеристик полуфабрикатов		
	прессованных полос сечением 80×150 мм из сплава 1933-Т122	штамповок толщиной до 100 мм из сплавов марок	
		1933-Т123	7085-Т7452**
$\sigma_B^*$ , МПа	≥520 (535–550)	≥510 (520–540)	≥503
$\sigma_{0,2}^*$ , МПа	≥460 (490–505)	≥460 (460–505)	≥462
$K_{1c}$ , МПа $\sqrt{m}$	≥37,5 (38–41)	≥37,5 (37,5–38,2)	≥32,4
СРТУ: $dI/dN$ , мм/кцикл, при $\Delta K$ , МПа $\sqrt{m}$			
МЦУ: $N_{ср}$ , кцикл (при $K_r=2,6$ ; $\sigma_{max}=157$ МПа)			
МЦУ: $N_{ср}$ , кцикл (при $K_r=2,6$ ; $\sigma_{max}=157$ МПа)	260	250	–
$\sigma_{ост}$ , МПа	–	50–120*	–

\* При закалке в холодной воде  $\sigma_{ост} > 180$  МПа.

\*\* По AMS 4403.



Влияние содержания примесей железа и кремния на свойства поволоков из сплава 1933-Т2:

а – механические свойства (■ –  $\sigma_B$ , МПа; ■ –  $\sigma_{0,2}$ , МПа; □ –  $\delta$ , %);

б – трещиностойкость (■ –  $KCU$ , кДж/м<sup>2</sup>; ■ –  $K_{1c}$  (ДП), МПа  $\sqrt{m}$ ; □ –  $K_{1c}$  (ВД), МПа  $\sqrt{m}$ )

Таблица 3

## Долговечность при МЦУ поковок с различным содержанием железа и кремния

Содержание железа и кремния	Число циклов до разрушения (при $\sigma_{\max}=157$ МПа; $K_f=2,6$ ; $R=0,1$ ; $f=40$ Гц)
0,125% Fe; 0,065%Si	80000*–370000 ( $N_{cp}=250000$ )
0,05% Fe; <0,05%Si	>225000–370000 ( $N_{cp}=300000$ )

\* В очаге разрушения – включения интерметаллидов.

ния точных штамповок из алюминиевых сплавов в автомобилестроении (для поршней двигателей внутреннего сгорания, дизельных двигателей, компрессоров).

По оценкам экспертов в ближайшие 5–10 лет ожидается широкое освоение технологий тиксоформования как в массовом производстве индустриально развитых стран, так и в авиакосмической промышленности [20, 21].

При тиксоформовании процесс проводят в твердожидком состоянии металла заготовок, с предварительно подготовленной при первичной кристаллизации слитков мелкозернистой (размер литого зерна <100 мкм) глобулярной (недендритной) микроструктурой. В этом случае проявляется эффект тиксотропности металлических суспензий – способности значительно снизить сопротивление сдвиговым деформациям, что позволяет проводить процесс штамповки при незначительной удельной силе.

Ожидается, что точные штамповки из сплава 1933, изготовленные по разработанным технологиям, будут иметь преимущество перед полуфабрикатами, полученными по серийной технологии, по усталостной долговечности – не менее чем на 25% при одинаковом уровне прочностных характеристик. Будет достигнуто повышение КИМ до 65% (т. е. более чем в 3 раза) при снижении мощности оборудования, используемого для дефор-

мации, в 8–12 раз и износа штампов – в 1,5–2 раза. Снижение трудоемкости при последующей механической обработке составит не менее 50%.

Высокопрочный сплав 1933, отвечающий требованиям конструкторов по прочности, ресурсу и надежности, является одним из основных материалов для изготовления деталей силового каркаса планера (шпангоутов, лонжеронов, фитингов и т. д.) для современных перспективных самолетов (SSJ, MC-21 и др.).

За последние 5–10 лет во ФГУП «ВИАМ» совместно с отечественными металлургическими заводами выполнен большой комплекс работ по усовершенствованию состава сплава 1933 (в рамках марочного состава), в том числе по снижению содержания примесей железа и кремния, с целью повышения комплекса основных служебных характеристик и прокаливаемости при закалке. Разработаны трехступенчатые режимы старения, обеспечивающие одновременное повышение прочностных характеристик при сохранении высокой коррозионной стойкости. Разработаны режимы закалки с применением в качестве охлаждающей среды водных растворов полимеров, что позволяет существенно снизить уровень остаточных закалочных напряжений в кованных полуфабрикатах и избежать поводов и коробления при механической обработке деталей из сплава 1933.

## ЛИТЕРАТУРА

- Фридляндер И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. М.: Металлургия. 1979. 209 с.
- Фридляндер И.Н. Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970–2000 и 2001–2015 гг. //Технология легких сплавов. 2002. №4. С. 12–16.
- 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.
- Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 157–167.
- Тарасов Ю.М., Антипов В.В. Новые материалы ВИАМ – для перспективной авиационной техники производства ОАО «ОАК» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 5–6.
- Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А. Высокопрочные алюминиевые сплавы системы Al–Zn–Mg–Cu. Энциклопедия «Машиностроение». Т. II-3. Цветные металлы и сплавы. Композицион-  
ные металлические материалы. М. 2001. С. 94–128.
- Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 167–182.
- Кишкина С.И. Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов. М.: Металлургия. 1981. 279 с.
- Высокопрочный сплав на основе алюминия и способ получения изделия из него: пат. 2443793 Рос. Федерация; опубл. 27.02.12 Бюл. №6.
- Фридляндер И.Н., Ткаченко Е.А., Сенаторова О.Г., Молостова И.И. Развитие и применение высокопрочных сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu для авиакосмической техники /В сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 155–163.
- Скорняков В.И., Антипов В.В. Инновационный характер сотрудничества ОАО «КУМЗ» и ФГУП «ВИАМ» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 11–14.

12. Аналитический обзор //Металлургический бюллетень. 2009. №10 (108). С. 36–40.
13. Warren A.S. Developments and Challenges for Aluminum – A Boeing Perspective /In: Proc. of ICAA-9. Australia. 2004. С. 24–31.
14. Фридляндер И.Н., Добромыслов А.В., Ткаченко Е.А., Сенаторова О.Г. Перспективные высокопрочные материалы на алюминиевой основе //МиТОМ. 2005. №7. С. 17–23.
15. Высокопрочный сплав на основе алюминия и способ получения изделия из него: пат. 2443793 Рос. Федерация; опубл. 08.10.2010.
16. Ерасов В.С. Физико-механические характеристики как основные интегральные показатели качества авиационных конструкционных материалов: Методич. пособ. М.: ВИАМ. 2011. 16 с.
17. Семенов Б.И., Бочаров Ю.А. и др. Тиксоштамповка и тиксолитье – современные технологии формования алюминиевых и других сплавов в твердом жидком состоянии //Технология легких сплавов. 2010. №1. С. 129–150.
18. Семенов Б.И., Куштаров К.М. Производство изделий из металла в твердожидком состоянии. Новые промышленные технологии: Учеб. пособ. для вузов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. 223 с.
19. Hirt G., Kopp R. Thixoforming: semi-solid metal processing. Wiley-VCH. Verlag. GmbH&Co. 2009. 477 p.
20. Нго Тхань Бинь, Джиндо Н.А., Семенов А.Б., Семенов Б.И. Тиксоформинг высокопрочных сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2012. Спец. вып. «Прогрессивные материалы конструкции и технологии ракетно-космического машиностроения». С. 148–165.
21. Zoqui E.J. Torres L.V. Evaluation of the thixoformability of AA7004 and AA7075 alloys //Materials Research. 2010. V. 13 (3). P. 305–318.