

grishatty@gmail.com. Research interests: workflows in turbomachines, computational fluid dynamics, work processes of the jet engines.

УДК 620.22

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОВОЧНЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ AL-ZN-MG-CU С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ОСНОВНЫХ ЛЕГИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ, МИКРОДОБАВОК И ПРИМЕСЕЙ

© 2012 Р. О. Вахромов, Е. А. Ткаченко, В. В. Антипов

Федеральное государственное унитарное предприятие  
"Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов"  
Государственный научный центр Российской Федерации, Москва

Проведены комплексные исследования влияния содержания базовых легирующих элементов Zn, Mg, Cu, малых добавок Zr, Sc, Ag, примесей Fe и Si на прочность, вязкость разрушения, усталостные характеристики, коррозионную стойкость, параметры микроструктуры (дисперсоиды, упрочняющие выделения, степень рекристаллизации, размер зерна) кованных полуфабрикатов из высокопрочных сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu.

*Сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu-Zr, микродобавки Ag и Sc, примеси Fe и Si, кованные полуфабрикаты, механические свойства, коррозионная стойкость.*

Алюминиевые сплавы на основе системы Al-Zn-Mg-Cu на сегодняшний день остаются основным конструкционным материалом для применения в современной и перспективной аэрокосмической технике. Оптимизация химического состава и технологических процессов производства данных сплавов с целью достижения улучшенного комплекса прочности, вязкости разрушения и коррозионной стойкости непрерывно проводится в России и за рубежом с начала использования их в конструкциях самолётов. Одним из наиболее эффективных способов воздействия на комплекс свойств таких сплавов является легирование микродобавками переходных и других металлов, ограничение по примесям, а также применение сложных многоступенчатых режимов старения.

Существенное влияние на структуру и комплекс служебных свойств оказывает ограничение содержания примесей – железа и кремния, однако минимально возможное присутствие этих элементов в сплавах системы Al-Zn-Mg-Cu ранее было ограничено требуемой технологичностью при литье слитков. В настоящее время, благодаря использованию нового литейного оборудования, оснащённого приборами автоматического регулирования процессов литья слитков, применению эффективных

приборов и устройств для внепечного рафинирования расплава от окисных плёнок и газовых включений, разработке новых модификаторов литой структуры, стало возможным отливать слитки из высокопрочных сплавов Al-Zn-Mg-Cu, в которых содержание железа, кремния, существенно ниже, чем в серийных сплавах.

Для установления влияния железа и кремния на структуру, относительное удлинение, вязкость разрушения, характеристики трещиностойкости и усталостную долговечность в деформированных полуфабрикатах из сплава системы Al-Zn-Mg-Cu (типа 1933) в условиях ВИАМ были отлиты полунепрерывным методом в кристаллизатор скольжения слитки Ø 105 мм двух составов (табл. 1), из которых были изготовлены поковки размером 65×100×300 мм.

В сплаве №2 по сравнению со сплавом №1 снижено более чем в 2 раза содержание примесей железа и кремния.

Проведённые исследования макро и микроструктуры показали, что уменьшение содержания железа, кремния практически не оказало влияния на зёрненную структуру и качество опытных слитков и поковок (рис. 1-3).

Таблица 1 - Расчётный химический состав опытных сплавов (массовая доля в %)

№ сплава	Al	Zn	Mg	Cu	Zr	Ti	Fe	Si
1	Основа	7,0	1,7	1,1	0,11	0,05	0,125	0,08
2		7,0	1,7	1,1	0,11	0,02	0,05	0,04



Рис. 1. Макроструктура опытных слитков

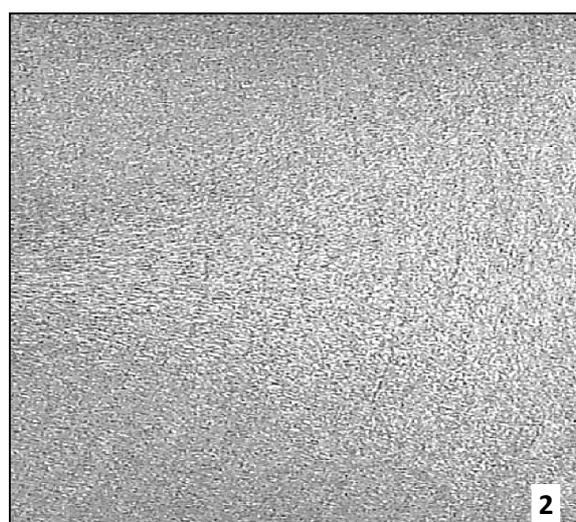
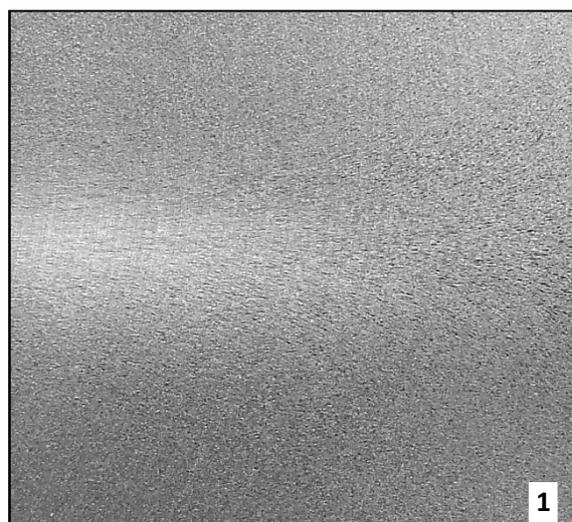


Рис. 2. Микроструктура опытных поковок

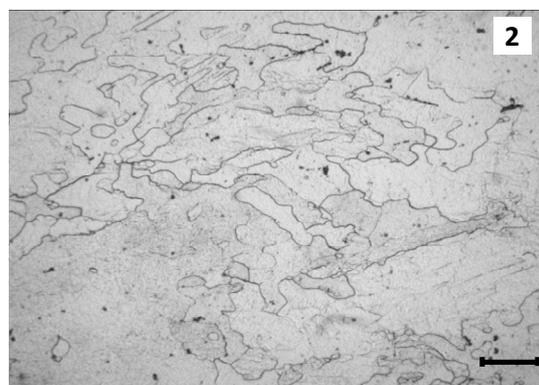
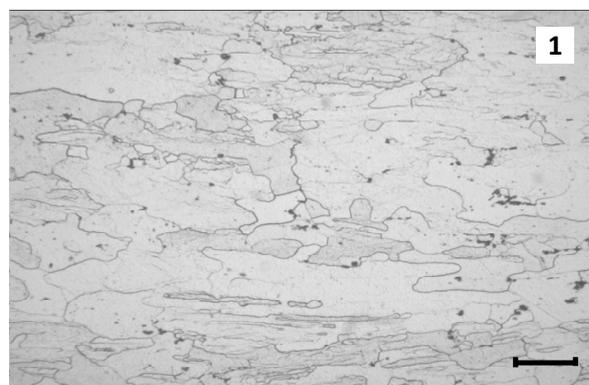


Рис. 3. Микроструктура опытных поковок

режиму T2 представлены в таблице 2, из которой следует, что прочностные характеристики исследованных поковок близки между собой и составляют

в продольном направлении:  $\sigma_b=480-485$  МПа,  $\sigma_{0,2}=445$  МПа.

Таблица 2 – Механические свойства опытных поковок (средние значения)

Номер сплава	Направление вырезки образцов	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	КСУ, кДж/м <sup>2</sup> (ПД)	$K_{IC}$ , МПа $\sqrt{м}$
1	Д	485	445	12,5	-	54 (ДП)
	П	485	440	11,5	76	-
	В	470	430	9,5	-	40 (ВД)
2	Д	480	445	14,5	-	58 (ДП)
	П	475	425	12,5	142	-
	В	460	420	12,0	-	51 (ВД)

По относительному удлинению заметное преимущество (примерно на 25%), особенно в долевым и высотном направлении, имеют поковки №2 с пониженным содержанием железа и кремния.

Ударная вязкость (КСУ) образцов, вырезанных в направлении ПД, имеет ту же закономерность, что и относительное удлинение (табл. 2), причём преимущество

поковок с пониженным содержанием железа и кремния в этом случае составляет более чем в 1,8 раза.

При испытаниях на вязкость разрушения и усталостную долговечность получены высокие результаты на всех исследованных поковках, однако наиболее высокие значения отмечаются у поковок состава №2 в направлении ВД (табл. 2,3).

Таблица 3 – Результаты испытаний на МЦУ

№ сплава	Число циклов до разрушения	
	При $\sigma_{max}=157$ МПа, $K_t=2,6$ , $R=0,1$ , $\nu=40$ Гц	
1	79 800*, 253 000, >305 000**, >316 000, >367 000	
2	225 000, 333 350**, >315 000, >358 000	

Примечание: \*в очаге разрушения – включения интерметаллидов, \*\*  $\nu=5$  Гц.

При определении коррозионных свойств установлено (табл. 4), что изменение содержания железа, кремния в исследованных пределах не оказали влияние

на склонность к расслаивающей и межкристаллитной коррозии опытных поковок.

Таблица 4 - Коррозионная стойкость опытных поковок

№ сплава	Место вырезки образца	Склонность к МКК, глубина, мм	Склонность к РСК, балл
1	Поверхность	-	3
	Середина	0,03	3
2	Поверхность	-	3
	Середина	нет	3

Изучение влияния содержания базовых легирующих элементов (Zn, Mg, Cu), комплексной добавки Zr+Sc+Ag на прочность, вязкость разрушения, усталостные характеристики и коррозионную стойкость проводили на

поковках размером 60x200x350 мм из сплавов, химический состав которых приведён в табл. 5. Состав сплава 3 отличается от композиции 4 по содержанию меди и малых добавок серебра и скандия.

Таблица 5 - Расчетный химический состав опытных сплавов (массовая доля в %)

№ сплава	Zn+Mg+Cu	Zr+Sc	Ag	Fe	Si	Al
3	11,8	0,25	0,1	0,05	0,03	Осн.
4	11,0	0,26	0,2	0,05	0,03	Осн.

Следует отметить, что практически все новые сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu содержат добавку Zr, необходимую для образования во время гомогенизации и закалки дисперсных фаз  $Al_3Zr$ , которые сдерживают статическую рекристаллизацию посредством укрепления межзеренных границ [1-3].

В последние годы наряду с добавкой Zr в качестве легирующей добавки получил распространение Sc, который обладает более сильным модифицирующим и антирекристаллизующим действием, чем Zr. Комплексная добавка Sc+Zr позволяет использовать сильнейшее модифицирующее действие скандия при его меньших концентрациях (до 0,2%), способствует значительному увеличению прочности сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu, повышает температуру рекристаллизации, оказывает существенное влияние на зёрненную структуру [3-5].

Роль добавки серебра в алюминиевые сплавы изучена в меньшей степени по сравнению с цирконием и скандием. Имеются данные, указывающие на то, что добавка Ag уменьшает степень перестаривания и поднимает критическую температуру устойчивости зон Г.П., влияет на ширину зон, свободных от выделений [6]. Вследствие этого высокая прочность может быть достигнута при более высоких температурах старения, что обеспечивает

одновременно и повышение коррозионной стойкости.

Электронно-микроскопический анализ образцов двух составов показывает, что их зёрненная структура имеет примерно одинаковый характер: преимущественно нерекристаллизованные субзёрна со средним размером 2-4 мкм. Сравнительно редко наблюдаются рекристаллизованные зёрна (рис. 4, а). На темнопольных снимках (рис. 4, б, в) видны дисперсоиды в виде частиц  $\beta'$ -фазы ( $Al_3Sc_xZr_{1-x}$ ) равноосной формы, которые имеют следующие ориентационные отношения с матрицей:  $\{011\}_\alpha // \{100\}_{\beta'}$  и  $\langle 011 \rangle_\alpha // \langle 100 \rangle_{\beta'}$ . Количественная оценка размеров и объёмной плотности дисперсоидов показала, что в сплаве, содержащем 0,1% Ag, средний размер дисперсоидов  $\beta'$ -фазы равен 15-18 нм, разброс размеров в пределах 10-25 нм, объёмная плотность изменяется в интервале  $2,6-3,1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . При увеличении содержания серебра до 0,2% в сплаве 3 несколько увеличивается средний размер дисперсоидов и разброс их размеров (до 19-20 и 10-30 нм, соответственно), объёмная плотность  $1,1-1,6 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Дисперсоиды сохраняют когерентную связь с матрицей, о чём свидетельствует появление специфического дифракционного контраста на светлопольном снимке в форме дужек с областью нулевой интенсивности (рис. 4, г). На границах субзёрен дисперсоиды не были обнаружены.

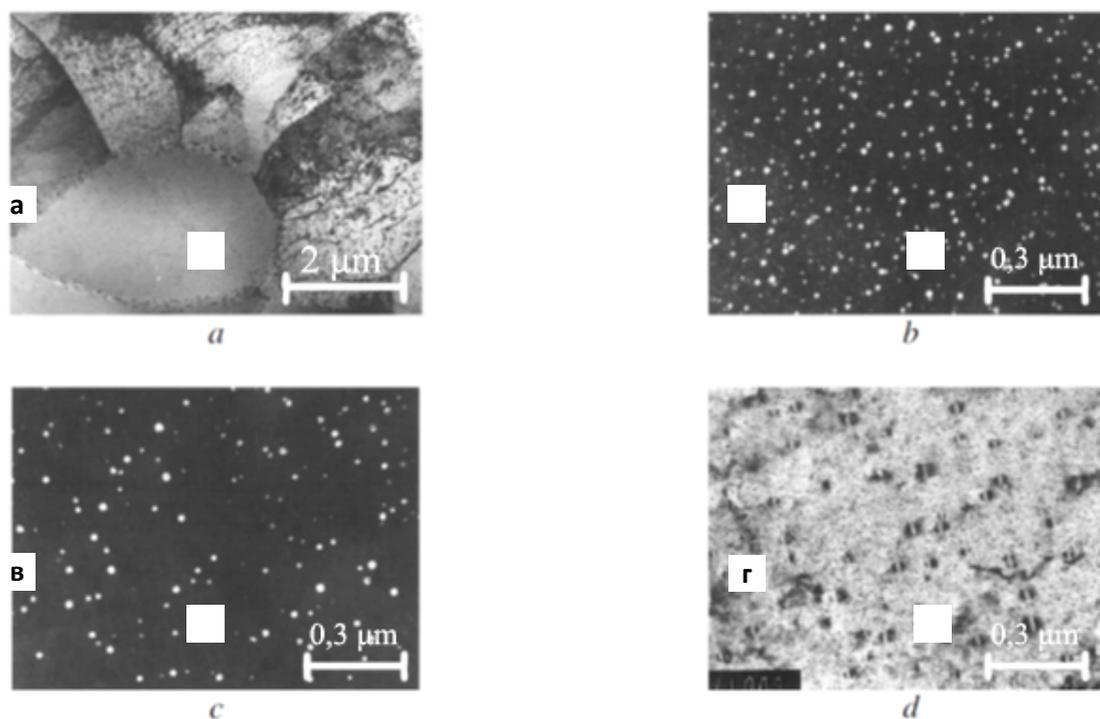


Рис. 4. Тонкая структура сплавов, полученная методом ПЭМ: структура субзерна (а), распределение дисперсоидов  $\beta'$ -фазы в сплавах, дисперсоиды на границах субзерен (г). (а –  $\times 15000$ ; б, с, д –  $\times 80000$ ; б, с – темнопольное изображение)

В табл. 6 приведены результаты испытаний образцов из поковок двух сплавов, термообработанных

оптимальному трёхступенчатому режиму Т102, в сравнении со сплавом без Ag и Sc.

Таблица 6 – Свойства поковок из двух сплавов (продольное направление)

№ сплава	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$K_{IC}$ , МПа $\sqrt{м}$	МЦУ*, кцикл	КР, $\sigma_{кр.}$ , МПа	РСК
3	650	610	10	32	250	$\geq 170^{**}$	3
4	600	550	10	45	300	$\geq 250^{**}$	3
без Ag, Sc	560	520	10	28	200	$\geq 150^{**}$	ЕВ

Примечание: \* $\sigma_{max}$ =157 МПа,  $K_t$ =2,6, R=0,1,  $v$ = 40 Гц, \*\* Направление ПД.

Как показали результаты испытаний, приведённые в табл. 6, введение 0,1-0,2 % масс серебра и скандия в сплав системы Al-Zn-Mg-Cu с добавками циркония приводит к одновременному повышению прочностных характеристик, вязкости разрушения и усталостной долговечности и улучшает характеристики свариваемости.

При проведении оценки свариваемости методом аргодуговой сварки (ААрдЭС) варьировали величину силы тока, скорость сварки, а также подбирали оптимальный расход аргона. Анализ структуры сварных соединений показал, что поры и раковины в металле шва, зонах сплавления и термического влияния практически отсутствуют.

Микроструктура шва сварного соединения, полученного с присадочной проволокой из сплава 1217 (Al-Cu-Sc), мелкозернистая, однородная (размер зерна менее 10 мкм). Оценку свариваемости методом электролучевой сварки проводили на прессованных полосах толщиной 40 мм (рис. 5, а,б) [7].

Для сварных соединений сплава с комплексной добавкой Zr+Sc+Ag (ЭЛС) характерно наличие мелкозернистой равноосной структуры с величиной зерна 8–15 мкм (рис. 5, в). В зоне термического влияния отсутствуют оплавления по границам зерен.

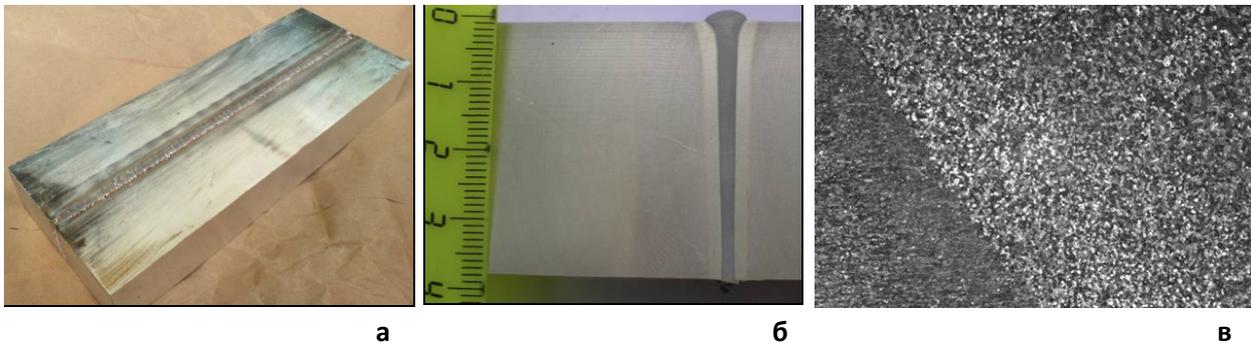


Рис.5. Внешний вид (а), макроструктура сварного соединения выполненного ЭЛС (б), микроструктура переходной зоны (в) ( $\times 200$ ) прессованной полосы

Ширина зоны с заметными структурными изменениями составляет всего 2–3 мм, что подтверждается результатами замера микротвёрдости. Проведено исследование механических свойств сварных соединений. В отличие от серийных сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu, сплав, содержащий Ag, Sc и Zr, обладает удовлетворительной свариваемостью: прочность сварных соединений, полученных методом

автоматической аргоно-дуговой сварки, составляет не менее 0,6 от прочности основного металла, сохраняется высокая коррозионная стойкость, а минимальный угол изгиба сварного образца  $\alpha > 45$  градусов. Для сварных соединений (ЭЛС) прессованных полос из сплава с комплексной добавкой Zr+Sc+Ag прочность составляет 0,8 от прочности основного металла (табл. 7).

Таблица 7 - Механические и коррозионные свойства сварных соединений полуфабрикатов, полученных при сварке различными способами.

Свойства	Значения свойств сварных соединений сплавов	
	ЭЛС	ААрДЭС
Вид сварки	ЭЛС	ААрДЭС
$\sigma_{в.св.}$ , МПа	470	385
ЕХСО	ЕА	ЕА
SCC $\sigma_{ст}$ , МПа	$\geq 250$	$\geq 250$

### Заключение

1. Показано, что понижение содержания примесей Fe + Si ( $\leq 0,10$  %) в деформированных полуфабрикатах из сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu приводит к повышению относительного удлинения, вязкости разрушения, характеристик трещиностойкости и усталостной

долговечности.

2. Установлено существенное положительное влияние добавки 0,1-0,2% серебра на комплекс прочностных и коррозионных характеристик, вязкости разрушения и сопротивления усталости, а также характеристики свариваемости сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu ( $\sigma_{св. соед.} \geq 0,8\sigma_{в}$

осн. мет.).

3. Основной структурный эффект от присутствия 0,1-0,2 % серебра в сплавах системы Al-Zn-Mg-Cu состоит в ускорении процесса  $M' \rightarrow M$  превращения, увеличении объёмной доли зернограницных выделений частиц  $M'$  и M-фаз, а также в уменьшении ширины зоны, свободной от выделений у границ и субграниц.

4. Представленные результаты позволяют рассчитывать, что высокопрочные ковочные сплавы в ближайшие 15-20 лет сохранят ведущую позицию в силовых элементах планера перспективных самолётов.

#### Библиографический список

1. Фридляндер, И.Н. Высокопрочные деформируемые алюминиевые сплавы [Текст] / И.Н. Фридляндер – М.: Оборонгиз, 1960. - 290 с.

2. Фридляндер, И.Н. Высокопрочные сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu [Текст] / И.Н.

Фридляндер, О.Г. Сенаторова, Е.А. Ткаченко – М.: Машиностроение, т.2-3, 2001. – С. 94-128.

3. Фридляндер, И.Н. Перспективные алюминиевые сплавы [Текст] / И.Н. Фридляндер // «Технология легких сплавов», №4. 2002.

4. Kaigorodova, L.I.FMM [Текст] / L.I. Kaigorodova, E.I. Selnhina, E.A. Tkachenko, O.G. Senatorova. – 1996, v.81, issue 5, 78-86.

5. Polmer, I.J. Proceeding ICAA6, Toyohashi, Japan, 1998, vol.1, 75-86.

6. Фридляндер, И.Н. МиТОМ [Текст] / И.Н. Фридляндер, А.В. Добромислов, Е.А. Ткаченко, О.Г. Сенаторова – №7. 2005, 17-23.

7. Лукин, В.И. Сварка высокопрочных алюминиевых сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu [Текст] / В.И. Лукин, Е.Н. Иода // «Сварочное производство», №2. 2011. С. 7-11.

### NATURAL DEVELOPMENT OF FORMING STRUCTURE AND PROPERTIES OF FORGEABLE AL-ZN-MG-CU ALLOYS HAVING DIFFERENT CONTENT OF MAIN ALLOYING ELEMENTS, MICROADDITIVES AND IMPURITIES

© 2012 R. O. Vakhromov, V. V. Antipov, E. A. Tkatchenko

Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials», State Scientific Center of Russian Federation, Moscow

The complex studies have been made to investigate the influence of the main alloying elements Zn, Mg, Cu, small additives Zr, Sc, Ag, impurities Fe and Si on the strength, fracture toughness, fatigue properties, corrosion resistance, microstructure parameters (dispersoids, strengthening precipitates, recrystallization degree, grain size) of forged semiproducts manufactured from high strength forgeable alloys of Al-Zn-Mg-Cu system.

*Alloys of the Al-Zn-Mg-Cu-Zr, microadditives Ag and Sc, impurity Fe and Si, forged semi-product, mechanical properties, corrosion resistance.*

#### Информация об авторах

**Вахромов Роман Олегович**, начальник лаборатории «Алюминиевые деформируемые сплавы», ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов». E-mail: org80@viam.ru. Область научных интересов: разработка высокоресурсных и жаропрочных сплавов на основе системы Al-Cu-Mg, технологии изготовления катаных и кованных полуфабрикатов.

**Антипов Владислав Валерьевич**, кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научному направлению «Алюминиевые, магниевые, титановые и бериллиевые сплавы», ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов». Область научных интересов: разработка алюминий-литиевых сплавов пониженной плотности и слоистых алюмокомпозитов.

**Ткаченко Евгения Анатольевна**, начальник сектора «Высокопрочные алюминиевые сплавы», ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов». Область научных интересов: разработка высокопрочных алюминиевых ковочных сплавов на основе системы Al-Zn-Mg-Cu.

**Vahromov Roman**, Head of Laboratory «Aluminium wrought alloy», Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials». E-mail: org80@viam.ru. Area of research: development of high-resource and heat resistant alloys of Al-Cu-Mg, manufacturing technologies rolled and forged semis-product.

**Antipov Vladislav**, Ph.D., Deputy General Director for scientific direction «Aluminum, magnesium, titanium and beryllium alloys», Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials». Area of research: development of aluminum-lithium alloys and laminated aluminum - glassplastics.

**Tkachenko Evgeniya**, Head of Sector «High-strength aluminum alloy», Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials». Area of research: development of high-strength aluminum forging alloys of Al-Zn-Mg-Cu.