

УДК 669.715

*А.И. Асташкин<sup>1</sup>, В.В. Бабанов<sup>1</sup>, А.А. Селиванов<sup>1</sup>, Е.А. Ткаченко<sup>1</sup>***СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МАССИВНЫХ ПОКОВОК С ПОНИЖЕННЫМ УРОВНЕМ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1933сб СБАЛАНСИРОВАННОГО СОСТАВА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-13-21

*В статье по результатам сравнительных исследований и испытаний показаны преимущества массивных поковок с пониженным уровнем остаточных напряжений из алюминиевого сплава 1933сб сбалансированного состава по сравнению с аналогичными серийными полуфабрикатами. Массивные поковки толщиной 100–150 мм из сплава 1933сб, подвергнутые правке сжатием в свежезакаленном состоянии, имеют пониженный (более чем в 2 раза) уровень закалочных остаточных напряжений при повышенных прочностных характеристиках (на 30–40 МПа и более), особенно в поперечном по толщине направлении (более чем на 10 %), уровне относительного удлинения и вязкости разрушения.*

**Ключевые слова:** сплав 1933сб, массивные поковки, остаточные напряжения, механические свойства, коррозионные свойства, вязкость разрушения.

*A.I. Astashkin<sup>1</sup>, V.V. Babanov<sup>1</sup>, A.A. Selivanov<sup>1</sup>, E.A. Tkachenko<sup>1</sup>***STRUCTURE AND PROPERTIES OF MASSIVE FORGINGS WITH A REDUCED LEVEL OF RESIDUAL STRESSES MADE OF ALUMINUM ALLOY 1933sb OF BALANCED COMPOSITION**

*Based on the results of comparative studies and tests, the article shows the advantages of massive forgings with a reduced level of residual stresses made of 1933sb alloy balanced composition in comparison with similar serial semi-finished products. Massive forgings with a thickness of 100–150 mm from a 1933sb alloy of a balanced composition have a lower (more than 2 times) level of quenching residual stresses with strength characteristics increased (by 30–40 MPa and higher), especially in the direction of transverse in thickness (more than 10 %), the level of elongation and fracture toughness.*

**Keyword:** alloy 1933sb, forgings, residual stresses, mechanical properties, corrosion 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

**Введение**

В настоящее время существенно возросли требования к служебным и технологическим характеристикам материалов в целях обеспечения снижения массы и повышения экономической эффективности изделий авиационной и ракетно-космической техники нового поколения. Сплавы цинковой группы, особенно в виде кованных, пресованных и катаных полуфабрикатов, применяемых для изготовления сложноконтурных деталей силового каркаса планера самолета, не исчерпали своих потенциальных возможностей. Улучшение комплекса служебных и технологических свойств материалов

является важнейшей задачей современного материаловедения, решение которой позволит обеспечить повышение характеристик ресурса и надежности изделий авиационной и ракетно-космической техники нового поколения наряду с повышением экономической эффективности получения изделий благодаря снижению трудоемкости изготовления деталей и увеличению коэффициента использования материалов [1–11].

При механической обработке деталей, особенно сложной формы, из термоупрочняемых алюминиевых сплавов нередко происходит их коробление, причиной которого являются остаточные закалочные напряжения. Устранение коробления требует проведения дополнительных правильных операций, поскольку существенное отклонение от заданных размеров приводит к браку изделия. Снижение остаточных напряжений в полуфабрикатах позволит существенно сократить трудоемкость термической и механической обработок при изготовлении деталей на самолетостроительных заводах, повысить коэффициент использования материала при обеспечении высокого уровня требований конструкторов к комплексу механических и коррозионных свойств крупногабаритных полуфабрикатов.

Одним из известных и эффективных методов снижения остаточных напряжений является правка полуфабрикатов в свежезакаленном состоянии методами растяжения или сжатия с остаточной деформацией до 3–5 %. Данный метод применяется на металлургических заводах, оснащенных необходимым оборудованием – растяжными машинами и прессами для правки.

В настоящее время для изготовления силовых деталей современных самолетов Sukhoi Superjet 100, MC-21 и других широко используются крупногабаритные массивные поковки из высокопрочного алюминиевого сплава 1933.

Ввиду того, что допустимая толщина полуфабрикатов из алюминиевых сплавов при закалке ограничена их прокаливаемостью, массивные полуфабрикаты на самолетостроительных заводах поставляют без термической обработки и без правки. На самолетостроительных заводах заготовку детали подвергают закалке после черновой механической обработки. При этом в заготовках возникают остаточные закалочные напряжения, которые приводят к нежелательным поводкам и короблению деталей при их окончательной механической обработке. Поэтому на самолетостроительных заводах заинтересованы в получении непосредственно с металлургических заводов массивных полуфабрикатов в термоупрочненном состоянии с пониженным уровнем остаточных закалочных напряжений.

С целью расширения диапазона толщин полуфабрикатов из сплава 1933 в состояниях T2 и T3, поставляемых с металлургических заводов с пониженным уровнем остаточных напряжений, необходимо повысить прокаливаемость сплава. В результате ранее проведенных исследований [12, 13] установлено, что при сбалансированном легировании сплава 1933 цинком и магнием (отношение  $Zn:Mg \geq 4,0$ ) его прокаливаемость повышается, что позволяет увеличить толщину закаливаемых поволоков из сплава с 80 до 150 мм без снижения механических и коррозионных свойств, вязкости разрушения и с уменьшением диапазона значений свойств по толщине массивных полуфабрикатов, что обеспечивает возможность снижения уровня остаточных напряжений в полуфабрикатах методом правки в свежезакаленном состоянии на металлургическом заводе.

В данной статье приведены результаты сравнительных исследований и показаны преимущества массивных поволоков с пониженным уровнем остаточных напряжений из сплава 1933 сбалансированного состава по сравнению с аналогичными полуфабрикатами из сплава серийного состава [14, 15].

### Материалы и методы

Исследование проводили на массивных поковках толщиной 100–150 мм, изготовленных в производственных условиях АО «АМР» из сплава марки 1933сб по оптимизированной для данного сплава технологии, включающей двухступенчатый режим гомогенизации слитков, обеспечивающий повышение их технологической пластичности, закалку, правку в свежезакаленном состоянии сжатием со степенью остаточной деформации 2–5 % для снижения остаточных напряжений, многоступенчатые режимы старения Т2Н и Т3Н.

Образцы для исследования структуры, определения механических и коррозионных свойств, вязкости разрушения отбирали из различных зон по толщине массивных поковок.

Анализ микроструктуры проводили на микроскопе Olympus GX 51 по методике МР 21-31–85.

Электронно-микроскопические структурные исследования выполняли на просвечивающем электронном микроскопе JEM 200СХ (ЕМ 132039-49) по методике ММ 1.595-17-344–2007. Фольги для исследований изготавливали электроэрозионной резкой, шлифовкой и электролитической полировкой при температуре –38 °С в спиртовом растворе азотной кислоты.

Образцы для определения механических свойств (пределов текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) и прочности ( $\sigma_B$ ), относительного удлинения ( $\delta$ ) при растяжении) испытывали на машине Zwick/Roell Z250 при комнатной температуре на цилиндрических образцах (по 5 образцов на точку) в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–84.

Критический коэффициент вязкости разрушения  $K_{Ic}$  при внецентренном растяжении компактных образцов (по 5 образцов на точку) определяли на испытательной машине Walter + Bai LFMZ-250 в соответствии с ОСТ 25.506–85.

Склонность к межкристаллитной коррозии определяли по ГОСТ 9.021–74 (по 6 образцов на точку).

Остаточные напряжения в исследуемых полуфабрикатах, подвергнутых правке в свежезакаленном состоянии, а затем состаренных по режимам Т2Н и Т3Н, оценивали рентгеноструктурным методом на анализаторе остаточных напряжений по методике ММ 1.595-17-225–2004. Расчет значений остаточных напряжений выполняли по методу « $\sin^2\psi$ ». Информационная глубина проникновения рентгеновского пучка составляла 60 мкм.

### Результаты и обсуждение

#### *Структура и свойства массивных поковок толщиной 100–150 мм из сплавов 1933сб и 1933*

Исследованные поковки из сплава 1933сб, изготовленные из слитков, гомогенизированных по двухступенчатому режиму, и деформированные по оптимальному режимуковки, имеют однородную по толщине частично рекристаллизованную структуру (рис. 1, а, б). В структуре серийных поковок из сплава 1933 отмечается укрупнение микрзерна в центральной зоне по сечению поковки (рис. 1, в, г).

Остаточные напряжения после термической обработки определяли на поверхности поковок в различных зонах по длине и ширине полуфабрикатов. Результаты обработки данных представлены в табл. 1.

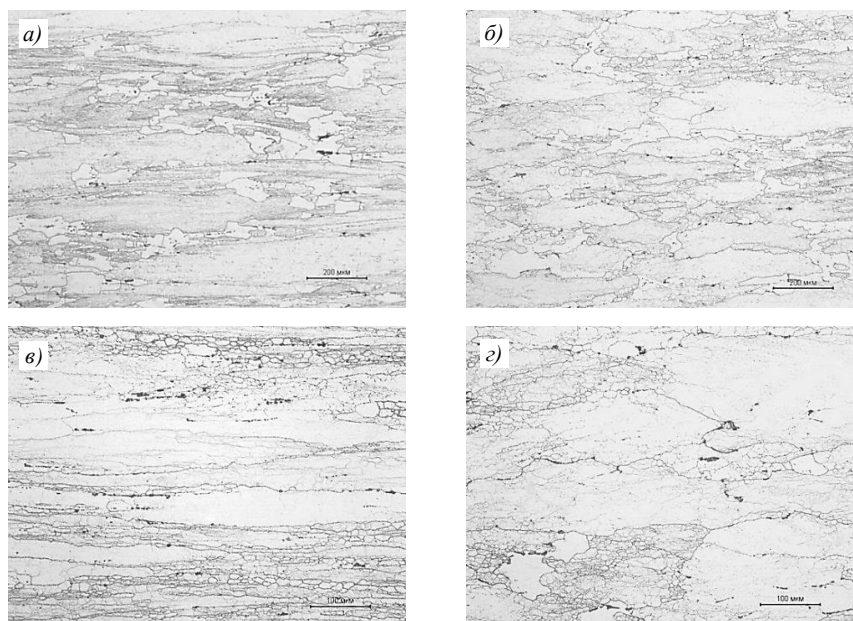


Рис. 1. Микроструктура поверхностной (а, в) и центральной зон (б, г) массивных поковок толщиной 150 мм из сплава 1933сб (а, б) и серийных поковок из сплава 1933 (в, г)

Таблица 1

**Остаточные напряжения в поковках толщиной 100–150 мм из сплавов 1933сб и 1933**

Сплав	Состояние сплава	Метод обработки	Остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ , МПа
1933сб	Т2Н	Правка в свежезакаленном состоянии сжатием со степень деформации 2–5 %	$(-82\pm 11) \div (-90\pm 15)$
	Т3Н		$(-72\pm 30) \div (-78\pm 12)$
1933	Т2	Без правки	$-185\pm 11$
	Т3		$-156\pm 11$

Все измеренные на поверхности поковок напряжения являются напряжениями сжатия. Уровень остаточных напряжений в поковках благодаря правке сжатием снижен более чем в 2 раза. Отмечается тенденция к незначительному уменьшению значений остаточных напряжений в поковках после старения по более высокотемпературному режиму старения Т3Н по сравнению с режимом Т2Н.

*Механические свойства и вязкость разрушения*

Проведенные испытания показали, что механические свойства исследованных поковок из сплавов 1933сб и 1933 в поверхностной зоне близки между собой и имеют в продольном и поперечном направлениях следующие значения:

- в состоянии Т2Н:  $\sigma_b = 500\text{--}525$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 440\text{--}475$  МПа,  $\delta = 11,5\text{--}15$  %;
- в состоянии Т3Н:  $\sigma_b = 455\text{--}465$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 390\text{--}415$  МПа,  $\delta = 12,5\text{--}16$  %.

Обусловленное прокаливаемостью различие механических свойств в центральной зоне по толщине полуфабрикатов из сплавов сбалансированного и серийного составов показано в табл. 2.

Из данных, представленных в табл. 2, следует, что подвергнутые правке сжатием поковки из сплава сбалансированного состава 1933сб имеют уровень прочностных характеристик на 30–40 МПа больше по сравнению с поковками из сплава серийного состава. При этом по уровню относительного удлинения и вязкости разрушения, особенно в направлении по толщине, также имеют преимущество (на ~10 %) поковки из сплава 1933сб.

Таблица 2

**Механические свойства и вязкость разрушения  
в центральной зоне поковок толщиной 100–150 мм из сплавов 1933сб и 1933**

Сплав	Состояние сплава	Направление волокна в образце	Предел прочности при растяжении*, МПа	Условный предел текучести*, МПа	Относительное удлинение*, %	Вязкость разрушения*, МПа $\sqrt{м}$
1933сб	Т2Н	Продольное	<u>500–515</u> 505	<u>465–475</u> 470	<u>8,0–8,5</u> 8,0	<u>35,8–36,2</u> 36,0
		Поперечное по толщине	<u>470–475</u> 470	<u>440–450</u> 445	<u>5,5–6,0</u> 5,5	<u>26–28,5</u> 27
1933	Т2	Продольное	<u>460–480</u> 475	<u>410–430</u> 415	<u>6,5–7,5</u> 7,0	<u>32–34</u> 32,5
		Поперечное по толщине	<u>440–455</u> 445	<u>390–420</u> 405	<u>2,0–3,5</u> 3,0	<u>22,3–24</u> 23
1933сб	Т3Н	Продольное	<u>450–460</u> 455	<u>410–430</u> <u>420</u>	<u>9,5–10,5</u> 10,0	<u>41,0–41,8</u> 41,6
		Поперечное по толщине	<u>425–435</u> 430	<u>395–405</u> 400	<u>6,0–7,0</u> 6,5	<u>26,0–28,5</u> 27
1933	Т3	Продольное	<u>410–430</u> 415	<u>330–350</u> 340	<u>7,0–8,0</u> 7,5	<u>40,0–40,8</u> 40,3
		Поперечное по толщине	<u>390–410</u> 395	<u>310–330</u> 315	<u>2,5–4,0</u> 3,0	<u>22,5–25</u> 23,5

\* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

*Коррозионные характеристики*

Массивные поковки с пониженным уровнем остаточных закалочных напряжений из сплава 1933сб характеризуются высокой коррозионной стойкостью (табл. 3) – склонность к расслаивающей коррозии составляет 2/3 балла в состояниях Т2Н и Т3Н. При испытаниях на стойкость к межкристаллитной коррозии выявляются лишь единичные очаги глубиной, не превышающей 90 мкм. Серийные поковки из сплава 1933 в состояниях Т2/Т3 по коррозионным характеристикам незначительно уступают поковкам из сплава сбалансированного состава.

Таблица 3

**Коррозионные свойства поковок толщиной 100–150 мм из сплавов 1933сб и 1933**

Сплав	Состояние сплава	Зона вырезки образцов	Расслаивающая коррозия, балл	Межкристаллитная коррозия, мкм
1933сб	Т2Н	Поверхность	2/2	48 (единичные очаги)
		Середина	2/3	90 (единичные очаги)
1933	Т2	Поверхность	3/4	105–175
		Середина	4/4	147–175
1933сб	Т3Н	Поверхность	2/2	42 (единичные очаги)
		Середина	2/2	48 (единичные очаги)
1933	Т3	Поверхность	2/4	50–105
		Середина	3/4	50–70

*Электронно-микроскопическое исследование структуры массивных поковок*

Полученные различия по уровню механических и коррозионных свойств сравниваемых поковок из сплавов двух составов связаны с особенностями их тонкой структуры.

Более высокая устойчивость твердого раствора сплава 1933сб обеспечивает прокаливаемость по всей толщине массивной поковки – выделения  $\eta'$ -фазы на границах зерен в закаленном состоянии практически отсутствуют (рис. 2, *a*). В центральной зоне поковки толщиной 150 мм из сплава 1933 стандартного состава происходит распад твердого раствора на границах зерен (рис. 2, *б*) ввиду недостаточной прокаливаемости, что приводит к снижению прочностных свойств, пластичности и коррозионной стойкости в центральной зоне поковки после старения по сравнению со свойствами аналогичной поковки из сплава 1933сб.

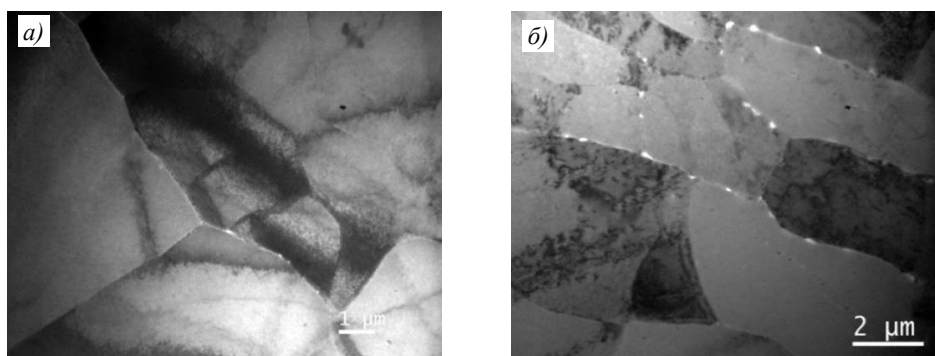


Рис. 2. Микроструктура границ зерен в центральной зоне сечения поволоков толщиной 150 мм из сплавов 1933сб (*a*) и 1933 (*б*) после закалки

Заметное влияние на однородность и уровень прочностных свойств и пластичности в поковке оказывает распределение дисперсоидов – частиц  $\beta'$ -фазы округлой формы. Положительное влияние двухступенчатого режима гомогенизации слитков, из которых изготовлены поковки из сплава 1933сб с пониженным уровнем остаточных закалочных напряжений, связано с тем, что частицы  $\beta'$ -фазы распределены равномерно и их количество в объеме материала заметно больше (рис. 3, *a*), чем в структуре серийной поковки (рис. 3, *б*).

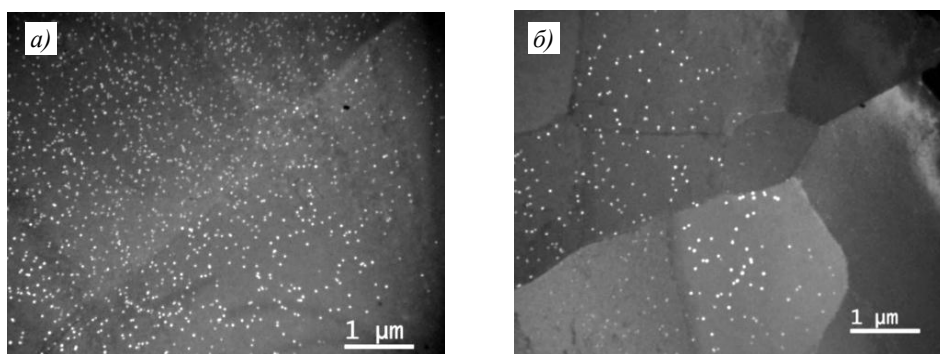


Рис. 3. Распределение дисперсоидов – частиц  $\beta'$ -фазы ( $Al_3Zr$ ) в образцах из поволоков сплавов 1933сб (*a*) и 1933 (*б*)

Характерными упрочняющими фазами для состаренных образцов из сплавов 1933сб и 1933 в состоянии Т2Н являются метастабильные  $\eta'$ -фазы. Для образца из поковки сплава 1933сб в состоянии Т2Н характерен интенсивный распад с выделением  $\eta'$ -фазы (рис. 4, *a*), размер которой несколько больше, чем у  $\eta'$ -фазы в поковке из сплава 1933 (рис. 4, *в*). Частицы  $\eta$ -фазы на границах выделяются равномерно, образуя узкую зону, свободную от выделений (ЗСВ): ~25 нм (рис. 4, *б*).

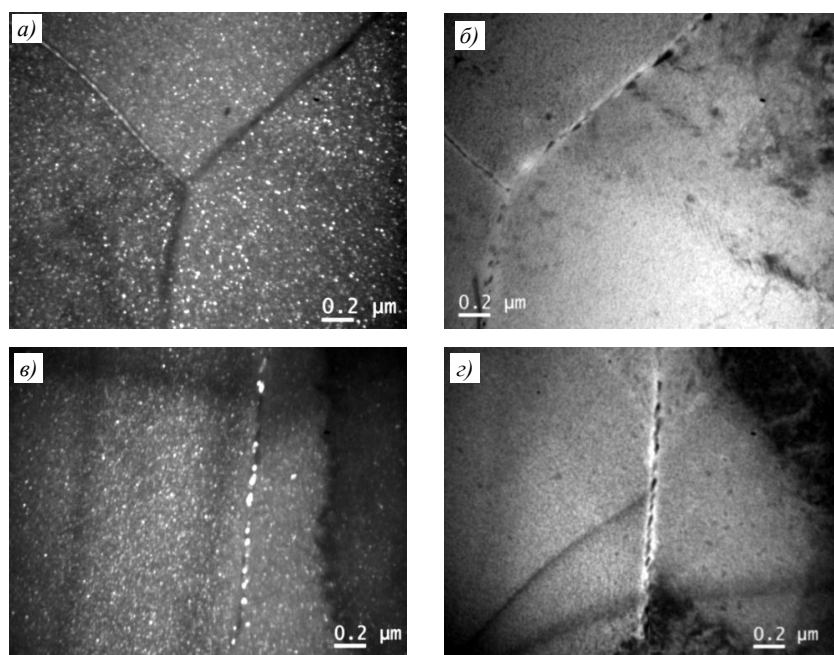


Рис. 4. Выделение упрочняющих частиц  $\eta'$ -фазы в объеме и на границах зерен (а, в) и зоны, свободные от выделений (б, г), в образцах из поковок сплавов 1933сб (а, б) и 1933 (в, г) в состоянии Т2Н (темнопольное (а, в) и светлопольное изображения (б, г))

В структуре образцов из поковки сплава 1933 в состоянии Т2Н по границам наблюдается неравномерный по размеру распад с образованием более широкой ЗСВ: ~50 нм (рис. 4, в, г). С такой структурой границы зерен связана большая склонность поковок из сплава 1933 в состоянии Т2Н к межкристаллитной коррозии.

В табл. 4 приведено сравнение данных из нормативной документации (ОСТ, ТУ) по механическим свойствам поковок из высокопрочных сплавов типа 1933 и широко применяемого в авиационных конструкциях среднепрочного ковочного сплава АК6-Т1, а также обобщены данные по значениям остаточных закалочных напряжений в поковках, подвергаемых правке в свежезакаленном состоянии для снижения остаточных напряжений, и в поковках без правки.

Таблица 4

**Основные свойства массивных поковок из сплава сбалансированного состава 1933сб толщиной 100–150 мм в состояниях Т2Н/Т3Н в сравнении со сплавами-аналогами [9, 11, 13, 15]**

Свойства	Направление вырезки образца	Значения свойств для поковок из сплава						
		1933сб		1933			АК6	
		в состоянии						
		Т2Н	Т3Н	Т2Н	Т3Н	Т2	Т3	Т1
		после правки сжатием (2–5 %) в свежезакаленном состоянии				без правки		
Предел прочности при растяжении, МПа	Д	≥490	≥440	≥460	≥410	≥480	≥430	≥370
Предел текучести, МПа	Д	≥440	≥380	≥410	≥330	≥430	≥370	≥275
Относительное удлинение, %	Д	≥7	≥8	≥6	≥7	≥6	≥7	≥8
Вязкость разрушения, МПа√м	ДП	≥34	≥39	≥28	≥35	≥39	≥43	≥36
Остаточные напряжения, МПа	–	±82	±75	±110	±110	±180	±156	±135
Толщина поковки при закалке, мм	–	150	150	150	150	80	80	100

**Заключения**

Массивные поковки толщиной 100–150 мм из сплава сбалансированного состава 1933сб, подвергнутые правке сжатием в свежезакаленном состоянии, имеют пониженный (более чем в 2 раза) уровень закалочных остаточных напряжений при повышенных (на 30–40 МПа) прочностных характеристиках и более высоких, особенно в высотном по толщине направлении (более чем на 10 %), уровнях относительного удлинения и вязкости разрушения по сравнению с аналогичными поковками из сплава марочного состава 1933, а также меньшую склонность к межкристаллитной коррозии.

Повышенный уровень прокаливаемости, механических свойств, вязкости разрушения и коррозионной стойкости поволоков из сплава 1933сб в состояниях Т2/Т3 обусловлен большей устойчивостью твердого раствора данного сплава, формированием более однородной структуры частиц дисперсоидов  $\beta'$ -фазы и упрочняющих  $\eta'$ -фаз как в объеме, так и на границах зерен.

Для изготовления крупногабаритных деталей изделий авиационной техники рекомендуется применение массивных поволоков из сплава сбалансированного состава 1933сб в состояниях Т2Н/Т3Н с пониженным уровнем остаточных закалочных напряжений, что позволит исключить термическую обработку заготовок на самолетостроительных заводах, сократить трудоемкость изготовления деталей и повысить коэффициент использования материала.

**Библиографический список**

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. ВИАМ: Продолжение пути // *Наука в России*. 2012. № 11. С. 16–21.
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // *Вестник Российской академии наук*. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
4. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // *Вестник РФФИ*. 2017. № 3. С. 97–105.
5. Лаптев А.Б., Павлов М.Р., Новиков А.А., Славин А.В. Современные тенденции развития испытаний материалов на стойкость к климатическим факторам (обзор). Часть 1. Испытания новых материалов // *Труды ВИАМ*. 2021. № 1 (95). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works> (дата обращения: 08.04.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-114-122.
6. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
7. Селиванов А.А., Ткаченко Е.А., Попова О.И., Бабанов В.В. Высокопрочный алюминиевый деформируемый свариваемый сплав В-1963 для деталей силового набора изделий современной авиационной техники // *Труды ВИАМ*. 2017. № 2 (50). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works> (дата обращения: 08.04.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-1-1.
8. Дуюнова В.А., Нечайкина Т.А., Оглодков М.С., Яковлев А.Л., Леонов А.А. Перспективные разработки в области легких материалов для современной авиакосмической техники // *Технология легких сплавов*. 2018. № 4. С. 28–43.
9. Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Молостова И.И. Развитие и применение высокопрочных сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu для авиакосмической техники // *75 лет. Авиационные материалы*. М.: ВИАМ, 2007. С. 155–163.
10. Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 195–211. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-195-211.

11. Антипов В.В. Перспективы развития легких сплавов для изделий авиационно-космической техники // Сб. докладов науч.-техн. конф. «Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и термической обработки легких сплавов». М.: ВИАМ, 2016. Ст. 1. URL: <http://conf.viam/conf/203/proceedings> (дата обращения: 08.04.2021).
12. Асташкин А.И., Бабанов В.В., Селиванов А.А., Ткаченко Е.А., Гусев Д.В., Царев М.В. Улучшение прокаливаемости массивных поковок из сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu путем сбалансированного легирования цинком и магнием // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 04. URL: <http://journal.viam.ru> (дата обращения: 08.04.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-35-42.
13. Давыдов В.Г., Захаров В.В., Захаров Е.Д., Новиков И.И. Диаграммы изотермического распада раствора в алюминиевых сплавах: справочник / под ред. И.И. Новикова. М.: Металлургия, 1973. 152 с.
14. Фридляндер И.Н. Создание, исследование и применение алюминиевых сплавов: Избранные труды: к 100-летию со дня рождения / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2013. 291 с.
15. Алюминиевые сплавы. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: справочное руководство / под ред. В.А. Ливанова, В.И. Елагина. М.: Металлургия, 1985. Т. IV. 408 с.