

Научная статья

УДК 669.715:669.018.62

DOI: DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-40-51

ОПЫТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕССОВАННЫХ И КОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ СПЛАВА SAS1 В УСЛОВИЯХ НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» – ВИАМ

Ю.Н. Нефедова¹, А.Е. Кожекин¹, А.В. Скугорев¹, А.А. Селиванов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлены результаты разработки технологии изготовления прессованных и кованых полуфабрикатов из труднодеформируемого алюминиевого сплава системы Al–Si–Ni марки SAS1 для изделий ракетно-космической техники. С учетом возможностей оборудования НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ отработана технология изготовления прессованных и кованых полуфабрикатов диаметром до 50 мм. Изготовленные прессованные полуфабрикаты обладают следующим уровнем физико-механических свойств: $d = 2,7 \text{ г/см}^3$, $\sigma_s = 325\text{--}335 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 210\text{--}230 \text{ МПа}$, $\delta_5 = 1,6\text{--}2,1 \%$, $\alpha \leq 14,4 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

Ключевые слова: алюминиевый сплав системы Al–Si–Ni, брикеты, прессованные полуфабрикаты, поковки, структура, физические и механические свойства

Для цитирования: Нефедова Ю.Н., Кожекин А.Е., Скугорев А.В., Селиванов А.А. Опыт изготовления прессованных и кованых полуфабрикатов из сплава SAS1 в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ // Труды ВИАМ. 2025. № 10 (152). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-40-51.

Scientific article

EXPERIENCE IN MANUFACTURING OF PRESSED AND FORGED SEMI-FINISHED PRODUCTS FROM THE ALLOY SAS1 UNDER CONDITIONS OF NATIONAL RESEARCH CENTER «KURCHATOV INSTITUTE» – VIAM

Yu.N. Nefedova¹, A.E. Kozhekin¹, A.V. Skugorev¹, A.A. Selivanov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The results of developing a technology for manufacturing of pressed and forged semi-finished products from a hard-to-deform aluminum alloy of the Al–Si–Ni system, grade SAS1 for rocket and space technology products are presented. Taking into account the capabilities of the equipment of the National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM, a technology has been developed for the production of pressed semi-finished products and forgings with a diameter of up to 50 mm. The manufactured pressed semi-finished products have the following level of physical and mechanical properties: $d = 2,7 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_s = 325\text{--}335 \text{ MPa}$, $\sigma_{0,2} = 210\text{--}230 \text{ MPa}$, $\delta_5 = 1,6\text{--}2,1 \%$, $\alpha \leq 14,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Keywords: aluminum alloy of the Al–Si–Ni system, briquettes, pressed semi-finished products, forgings, structure, physical and mechanical properties

For citation: Nefedova Yu.N., Kozhekin A.E., Skugorev A.V., Selivanov A.A. Experience in manufacturing of pressed and forged semi-finished products from the alloy SAS1 under condition of National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM. *Trudy VIAM*, 2025, no. 10 (152), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-40-51.

Введение

Для совершенствования ракетно-космической техники необходима разработка новых материалов с особыми свойствами, которые получают с применением современных технологических процессов производства [1–5]. Потребность в таких материалах обусловлена задачами улучшения качества изделий, расширения температурного диапазона работы материалов, защиты объектов техники от воздействия дестабилизирующих факторов при эксплуатации и т. д.

Отдельного внимания требуют алюминиевые порошковые сплавы с низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) и высоким сопротивлением микродеформациям для прецизионных приборов ориентации и навигации космических объектов. Это связано с тем, что процент ошибки при установлении координат навигационных источников из-за неустойчивости габаритов деталей из данных материалов достигает 20–50 % суммарной ошибки прибора.

Приватизация и коммерциализация отраслей промышленности в конце XX в. привели к упадку промышленного производства изделий из сплава САС1 из-за малого спроса. Но так как в прошлые годы элементная база систем космической ориентации и навигации деталей ракетно-космической техники безотлагательно нуждалась в использовании материалов с повышенной размерной стабильностью, вновь появилась необходимость в сплаве САС1.

В ракетно-космическом приборостроении применяют изделия, которые могут быть изготовлены только из прессованных и штампованных заготовок. Но на данный момент в РФ по ряду причин из сплава САС1 такие полуфабрикаты не производят, изготавливают только заготовки в виде брикетов, получаемых компактированием после вакуумирования в сварных капсулах из алюминиевых сплавов. По этой причине разработка технологических процессов изготовления прессованных и кованных заготовок из сплава САС1 представляет практический интерес [6].

Цель работы – разработка технологии изготовления прессованных и кованных полуфабрикатов из алюминиевого сплава марки САС1.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 10.10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии изготовления деформируемых полуфабрикатов и фасонных отливок из магниевых и алюминиевых сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Материалы и методы

Материалом для исследования служили прессованные полуфабрикаты Ø35, 40 и 50 мм из спеченного алюминиевого сплава марки САС1.

Исходным материалом для изготовления брикетов являлся алюминиевый порошковый сплав САС1. Химический состав порошка определяли методом атомно-эмиссионного анализа с индуктивно связанной плазмой в соответствии с ГОСТ 11739.1–11739.24–99. Химический состав порошка соответствовал требованиям ТУ 48-0107-42–80.

Брикетирование порошка проводили на гидравлическом прессе с усилием 4900 кН. Нагрев порошка при брикетировании осуществляли в муфельной печи. После брикетирования определяли механические характеристики изготовленных брикетов согласно ГОСТ 1497–2023.

Плотность брикетов и прессованных прутков определяли методом гидростатического взвешивания согласно ГОСТ 20018–74.

Структуру полуфабрикатов исследовали методом световой оптической микроскопии в соответствии с ММ 1.2.028–2024, ММ 1.2.085–2008 и МР 21-31–85.

Количественный металлографический анализ проводили в соответствии с ММ 1.595-17-321–2007 с применением стереомикроскопа и специализированного программного обеспечения.

Температурный коэффициент линейного расширения измеряли в диапазоне температур от 20 до 300 °С в соответствии с МИ 1.2.023–2011.

Осадку брикетов проводили на гидравлическом прессе с усилием 9810 кН.

Механические свойства пресованных прутков при растяжении определяли при комнатной температуре на пропорциональных цилиндрических образцах по ГОСТ 1497–2023.

Все исследования проводили на аттестованном оборудовании по действующим стандартам Российской Федерации.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Быстрозакристаллизованный порошковый алюминиевый сплав САС1 – это заэвтектический силумин, содержащий хрупкие первичные кристаллы кремния, что определяет его низкую технологическую пластичность (способность без разрушения изменять форму и размеры под действием внешнего усилия). Максимальное относительное удлинение таких сплавов вплоть до температуры солидус не превышает 2–3 % и реализуется в узком диапазоне температур [7–15], что затрудняет их обработку давлением, предопределяет низкую пластичность и ограничивает возможность получения деформированных полуфабрикатов при его обработке давлением [16–24].

Технология изготовления деформированных полуфабрикатов из сплава САС1 включала следующие основные технологические операции: компактирование порошка с получением брикетов, прессование брикетов, осадка пресованных заготовок для изготовления поковок.

Для оценки качества исходного порошка проведен входной контроль, включающий определение химического состава (табл. 1) и исследование микроструктуры порошка (рис. 1).

Таблица 1

Химический состав порошка из сплава САС1 (ОСТ 1 90048–90)

Материал	Содержание элементов, % (по массе)			
	Al	Fe	Ni	Si
САС1	61,2	0,25	6,98	29,2
В соответствии с ТУ 48-0107-42–80	Основа	≤0,6	5,0–7,0	25,0–30,0

Исследование микроструктуры показало, что порошок из сплава САС1 состоит из шаровидных частиц, содержащих кристаллы первичного кремния неправильной формы, близкие к равноосным (размером 1–2 мкм на периферии и 2–6 мкм в центре) (рис. 1).

Одна из важнейших проблем при компактировании порошков – процесс схватывания [6], в результате которого происходят дробление оксидных плен участков алюминиевой матрицы и их последующее упрочнение в результате диффузионных процессов.

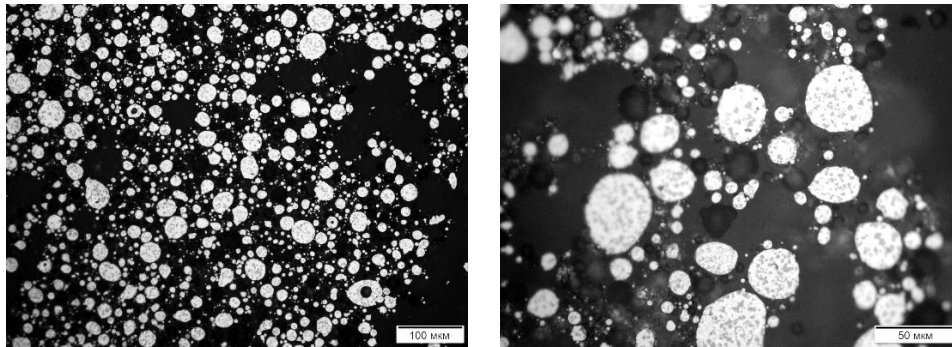


Рис. 1. Микроструктура частиц порошка из алюминиевого сплава САС1

Основополагающими требованиями к технологии компактирования являются:

- предотвращение образования грубых оксидных плен на поверхности частиц;
- обеспечение значительной пластической деформации для разрушения оксидных плен, образования ювенильных поверхностей в зоне контакта и их сближения на расстояния, близкие к межатомным.

Первое требование обеспечивается при получении порошков. Выполнение второго требования затруднено технологическими особенностями, так как при компактировании заготовок пластическая деформация ограничена свободным объемом в засыпке.

Для обеспечения приемлемого схватывания увеличивают время компактирования и температуру, учитывая ограничения по температуре солидус сплава (549 °С).

В интервале температур 100–300 °С α_{Al} -твердый раствор наиболее сильно пересыщен кремнием. При технологических нагревах это приводит к выделению кремния из твердого раствора на границах крупных частиц первичного кремния. Данный процесс может осуществляться до полного растворения частиц кремния в эвтектических колониях. Первичные кристаллы при этом теряют гранную форму поверхности и постепенно принимают глобулярную форму, т. е. осуществляется сфероидизация первичных кристаллов [6]. Таким образом, в сформированной матричной структуре отсутствуют эвтектические колонии, при этом матрицу образует алюминиевый твердый раствор с распределенными в нем кристаллами кремния (рис. 2).

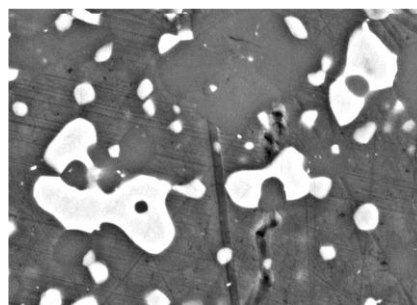


Рис. 2. Микроструктура порошка из сплава САС1 после отжига со ступенчатым нагревом [6]

Получившиеся кристаллы различаются по размерам, форма некоторых становится глобулярной. Таким образом, происходит формирование наиболее подходящей структуры для деформирования. Это объясняется пластичностью α_{Al} -фазы и тем, что длина свободного пробега дислокаций при деформации до очередной частицы хрупкого кремния на несколько порядков больше, чем в структуре, где вся α_{Al} -фаза связана в эвтектических колониях в тонкие пластины [6].

- Выбрано два экспериментальных режима компактирования:
- двухступенчатый нагрев до температуры 200 °С с выдержкой 1 ч и до температуры 520 °С с выдержкой 3 ч;
 - одноступенчатый нагрев до температуры 520 °С с выдержкой 4 ч.

Процесс изготовления брикетов из сплава САС1 включает следующие этапы:

- холодное компактирование;
- горячее компактирование;
- обточка брикетов, удаление алюминиевой фольги.

Последовательность операций холодного и горячего компактирования представлена на рис. 3.



Рис. 3. Технологический процесс компактирования заготовок из сплава САС1

По выбранным режимам с учетом возможностей оборудования НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ изготовлены брикеты из сплава САС1 габаритами $\varnothing 95 \times 105$ мм, определены их плотность, механические свойства и исследована микроструктура.

Результаты определения механических свойств и плотности брикетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства и плотность брикетов из сплава САС1

Вид заголовки	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	Плотность, г/см ³
Брикет из сплава САС1, изготовленный по режиму: одноступенчатому двухступенчатому	325–335	220–230	1,1–1,2	2,7
	330–340	240–250	1,0–1,2	
Брикет $\varnothing 320$ мм (ТУ 1-4-055–79)	$\geq 196,2$	–	$\geq 0,5$	–

Таким образом, результаты определения механических свойств показали, что брикеты из сплава САС1 обладают достаточно высоким уровнем механических свойств, что свидетельствует о хорошем качестве исходного материала и правильно подобранной технологии компактирования.

Результаты исследования микроструктуры брикетов из сплава САС1 приведены на рис. 4.

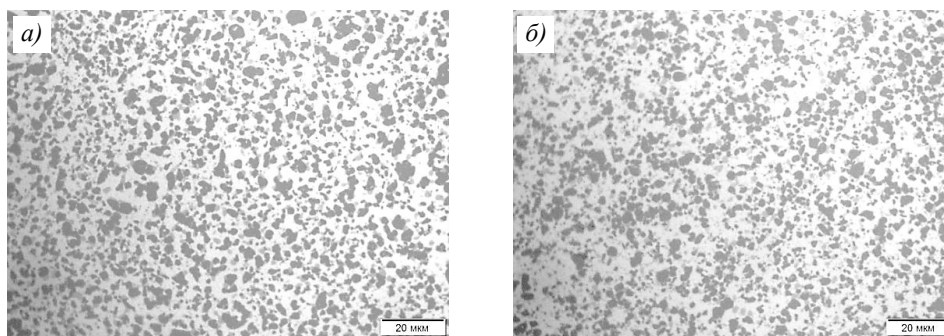


Рис. 4. Микроструктура брикетов из сплава SAC1, изготовленных с применением двухступенчатого (а) и одноступенчатого (б) нагрева

Микроструктура брикетов из сплава SAC1 имеет следующие особенности. Светлая часть представляет собой α_{Al} -твердый раствор, кремний и никель в ней отсутствуют. Темная часть представляет собой типичную структуру заэвтектического силумина. От структуры порошков сплава SAC1 она отличается тем, что в ней отсутствуют пластинчатые кристаллы эвтектического кремния и грубые первичные кристаллы полиэдрической и дендритной формы [6].

Установлено, что применение режима двухступенчатого нагрева не повлияло на микроструктуру брикетов из сплава SAC1. Нагревания при компактировании, не изменяя состава фаз, влияют на их морфологию. Структура, сохраняя наследственность литой, стремится к более равновесной. Кристаллы первичного кремния после компактирования увеличиваются, а их форма становится более округлой.

Таким образом, по результатам определения механических свойств, плотности и исследования структуры установлено, что применение двухступенчатого нагрева не влияет на характеристики брикета, в связи с чем в дальнейшем для уменьшения трудоемкости при изготовлении брикетов использовали одноступенчатый режим.

Чтобы оценить возможность изготовления поковок из сплава SAC1 по традиционной технологии, а именно ковкой прессованных прутков, в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ опробована технология изготовления прессованных прутков $\varnothing 30$, 40 и 50 мм.

Из анализа научно-технической литературы установлено, что сплав SAC1 обладает наибольшей технологической пластичностью в диапазоне температур 480–520 °С, в связи с чем выбрана температура нагрева брикетов перед прессованием 520 °С [6].

Перед прессованием контейнер нагревали при температуре 450 °С с выдержкой 6 ч. Скорость прессования составила 10 мм/с, температура нагрева заготовок (брикетов) 520 °С, выдержка 4 ч [6]. В результате изготовлены прессованные прутки $\varnothing 30$, 40 и 50 мм из сплава SAC1 (рис. 5).

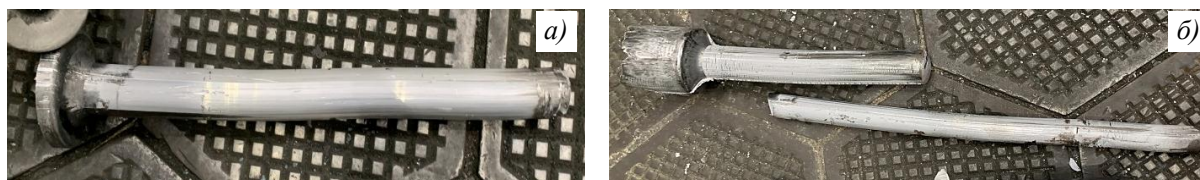


Рис. 5. Прессованные прутки из сплава SAC1 диаметром 40 (а), 35 и 50 мм (б)

Определены механические свойства полученных прутков (табл. 3).

Исследование механических свойств прутков показало, что в результате проведенных нагревов и деформации при прессовании уровень прочностных свойств прутков уменьшился по сравнению с показателями брикетов, а пластичность увеличилась.

Зависимость уровня механических свойств от величины коэффициента вытяжки не обнаружена. Механические свойства прутков соответствуют требованиям технических условий, что указывает на высокое качество полученных прессованных полуфабрикатов.

Таблица 3

**Механические свойства прутков из сплава САС1
(направление вырезки образца продольное)**

Диаметр прутка из сплава САС1, мм	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	Коэффициент вытяжки при прессовании
35	325–335	210–215	1,7–1,9	7,4
40	330–335	215–220	1,9–2,1	5,6
50		220–230	1,6–1,7	3,6
90–180 (ТУ 1-804308–92)	$\geq 254,8$	–	$\geq 1,0$	–
Типичные свойства [25]	245	152	1,0	

Определен температурный коэффициент линейного расширения при температурах 20–300 °С, который составил $(13,9–14,4) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Полученное значение меньше справочных данных, что объясняется содержанием Si в составе исходного порошка на верхней границе допустимого интервала (29,2 %).

Плотность прессованных прутков составила 2,7 г/см³.

Исследованы макро- и микроструктуры прессованных прутков (рис. 6 и 7).

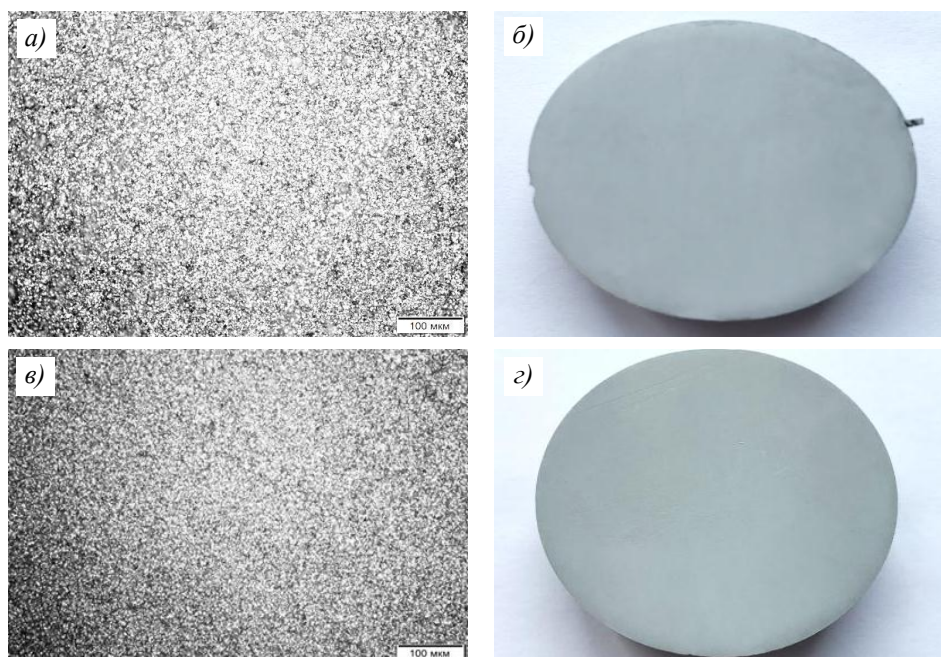


Рис. 6. Макроструктура прутков диаметром 35 (а, б) и 40 мм (в, г) из сплава САС1

После изготовления прессованные прутки порезаны на заготовки размерами $\varnothing 35,6 \times 89,5$, $\varnothing 40,6 \times 99,7$ и $\varnothing 50 \times 89,8$ мм для проведения испытаний на осадку.

Для определения максимально допустимой степени деформации образец размером $\varnothing 40,6 \times 99,7$ мм осажён до разрушения (рис. 8). При осадке образец прессованного прутка может выдержать деформации до 50 %.

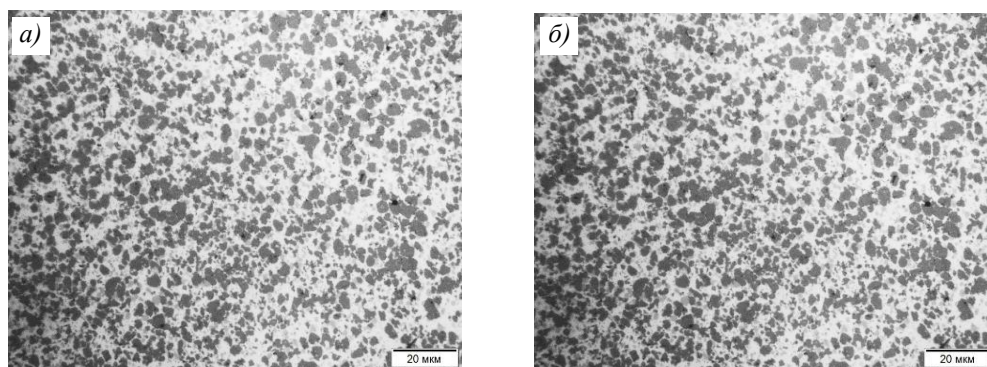


Рис. 7. Микроструктура прутков диаметром 35 (а) и 40 мм (б) из сплава SAC1



Рис. 8. Осаженный до разрушения образец из сплава SAC1

Нагретые заготовки размерами $\text{Ø}35,6 \times 89,5$ и $\text{Ø}50 \times 89,8$ мм из прутков из сплава SAC1 осаживали в три этапа. Общая степень деформации составила 55 %.

Технологическая схема изготовления поковок из сплава SAC1 осадкой из прессованных прутков представлена на рис. 9. Получены поковки размерами $\text{Ø}50 \times 40$ и $\text{Ø}46 \times 40$ мм.



Рис. 9. Технологическая схема изготовления поковок из сплава SAC1 осадкой из прутков

В результате проведенной работы изготовлены прессованные прутки диаметром до 50 мм и поковки диаметром до 50 мм из сплава SAC1 с использованием технологического оборудования, имеющегося в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. При наличии оборудования, позволяющего изготавливать прутки диаметром >50 мм, технологию возможно распространить и на изготовление полуфабрикатов большей номенклатуры.

Заключения

Представлены результаты разработки технологии изготовления прессованных и кованных полуфабрикатов диаметром до 50 мм из труднодеформируемого алюминиевого сплава САС1. Показаны последовательность и этапы технологических операций их изготовления.

Выбраны режимы компактирования брикетов из алюминиевого сплава САС1, в соответствии с которыми изготовлены брикеты габаритами $\varnothing 95 \times 105$ мм. Определены химический состав, плотность, механические свойства и исследованы структуры полученных брикетов. По результатам исследований установлено, что применение двухступенчатого нагрева не оказывает существенного влияния на характеристики брикета, в связи с чем применялся одноступенчатый режим нагрева заготовок.

Отработана технология изготовления прессованных прутков из сплава САС1. Изготовлены прутки $\varnothing 35$, 40 и 50 мм. Определены механические свойства и исследована структура прутков. В структуре прутков из сплава САС1 обнаружены скоагулированные кристаллы Si, которые имеют более направленное расположение по сравнению со структурой брикетов, что объясняется воздействием нагревов и деформацией материала. Определены механические свойства прессованных прутков в продольном направлении: $\sigma_b = 325\text{--}335$ МПа, $\sigma_{0,2} = 210\text{--}230$ МПа, $\delta_5 = 1,6\text{--}2,1$ %.

Оценена возможность изготовления прессованных прутков и поковок диаметром до 50 мм из сплава САС1 с использованием технологического оборудования, имеющегося в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Список источников

1. Фридляндер И.Н. Создание, исследование и применение алюминиевых сплавов. Избранные труды к 100-летию со дня рождения / под общ. ред. академика РАН Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2013. 291 с.
2. 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.
3. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
4. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. № 5. С. 7–27.
5. Каблов Е.Н. Материалы – основа любого дела // Деловая слава России. 2013. № 2. С. 4–9.
6. Васенев В.В. Разработка композиционного материала на основе системы Al–Si–Ni с низким значением ТКЛР и технологии получения полуфабрикатов для изделий ракетно-космической техники: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2017. С. 60.
7. Добаткин В.И., Елагин В.И., Федоров В.М. Быстрозакристаллизованные алюминиевые сплавы. М.: ВИЛС, 1995. 341 с.
8. Елагин В.И., Шмаков Ю.В. Гранулируемые алюминиевые сплавы и перспективы их развития. М.: Физмат, 2006. С. 140–154.
9. Бурковская Н.П., Бобровский А.П., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Сфероидизация порошковых композиций на основе тугоплавких металлов (обзор). Часть 1 // Труды ВИАМ. 2023. № 1 (119). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.01.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-128-138.
10. Бурковская Н.П., Бобровский А.П., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Сфероидизация порошковых композиций на основе тугоплавких металлов (обзор). Часть 2 // Труды ВИАМ. 2023. № 2 (120). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.01.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-101-112.

11. Елагин В.И. Перспективные гранулируемые алюминиевые сплавы // *Металлургия гранул алюминиевых сплавов*. 1983. Вып. 2. С. 3–84.
12. Бондарев Б.И., Напалков В.И., Тарарышкин В.И. Модифицирование алюминиевых деформируемых сплавов. М.: *Металлургия*, 1979. 214 с.
13. Кузнецов А.О., Шадаев Д.А., Конкевич В.Ю. и др. Модифицирование силуминов – разные подходы для одной системы легирования // *Технология легких сплавов*. 2014. № 4. С. 75–81.
14. Васенев В.В., Осинцев О.Е., Мироненко В.Н. и др. Разработка технологии получения штампованных деталей из сплава САС1-50 для авиакосмических навигационных приборов и проведение сравнительных испытаний моделей платформы из сплавов САС1-50 и АМг6 // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2016. № 12. С. 33–40.
15. Имамединов Э.Ш., Валуева М.И. Композиционные материалы для поршневых двигателей (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.
16. Щетинина Н.Д., Кузнецова П.Е., Дынин Н.В., Селиванов А.А. Сплавы на основе алюминия с добавками скандия и циркония в аддитивном производстве (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 3 (64). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.01.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-19-34.
17. Осинцев О.Е., Бецофен С.Я., Васенев В.В. и др. Исследование влияния кинетических и термодинамических факторов на структуру, свойства и особенности технологии получения деформированных полуфабрикатов из быстрозакристаллизованного алюминиевого сплава системы Al–Si–Ni // *Физика и химия обработки материалов*. 2016. № 3. С. 57–64.
18. Осинцев О.Е., Васенев В.В., Мироненко В.Н. и др. Разработка режимов дегазации порошков и порошковых композиций сплавов системы Al–Si–Ni и получение из них брикетов и деформированных полуфабрикатов // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2016. № 7. С. 29–36.
19. Мироненко В.Н., Никонов К.И., Бутрим В.Н. и др. Разрушение порошковых композитов Al–Si // *Деформация и разрушение материалов*. 2009. № 6. С. 36–39.
20. Васенев В.В., Мироненко В.Н., Бутрим В.Н. и др. Разработка технологии получения прессованных полуфабрикатов и штамповок из алюминиевого сплава САС1-50 и изучение их структуры и физико-механических свойств // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2015. № 9. С. 41–47.
21. Васенев В.В., Квитка Е.В., Мироненко В.Н. и др. Сопrotивление микропластической деформации порошковых композиционных материалов системы Al–Si // *Деформация и разрушение материалов*. 2008. № 8. С. 41–44.
22. Мироненко В.Н., Васенев В.В., Петрович С.Ю., Мышляев И.В. Структура и свойства компактных заготовок и прутков из сплава САС1 // *Цветные металлы*. 2018. Т. 4. С. 86.
23. Vasenev V.V., Mironenko V.N., Butrim V.N. et al. Development of the aluminium powder composite based on the Al–Si–Ni system and technology of billet fabrication of this composite // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2018. Vol. 59. Is. 6. P. 677–684.
24. Мироненко В.Н., Васенев В.В., Ведерникова М.И. и др. Структура и механизм деформации штамповок заэвтектических силуминов // *Физика и химия обработки материалов*. 2017. № 5. С. 78–87.
25. *Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под общ. ред. Е.Н. Каблова*. 7-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2008. Т. 4: Алюминиевые и бериллиевые сплавы, ч. 1: Деформируемые алюминиевые сплавы, кн. 2. С. 154–155.

References

1. Fridlyander I.N. *Creation, research and application of aluminum alloys. Selected works for the 100th anniversary of his birth*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: Nauka, 2013, 291 p.
2. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

3. Kablov E.N. Main results and directions of development of materials for advanced aviation equipment. *75 years. Aviation materials*. Moscow: VIAM, 2007, pp. 20–26.
4. Kablov E.N. Materials for aerospace equipment. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2007, no. 5, pp. 7–27.
5. Kablov E.N. Materials are the basis of any business. *Delovaya slava Rossii*, 2013, no. 2, pp. 4–9.
6. Vasenev V.V. *Development of a composite material based on the Al–Si–Ni system with a low TCLE value and technology for obtaining semi-finished products for rocket and space technology*: thesis. Cand. Sc. (Tech.), 2017, p. 60.
7. Dobatkin V.I., Elagin V.I., Fedorov V.M. *Rapidly crystallized aluminum alloys*. Moscow: VILS, 1995, 341 p.
8. Elagin V.I., Shmakov Yu.V. *Granulated aluminum alloys and prospects for their development*. Moscow: Fizmat, 2006, pp.140–154.
9. Burkovskaya N.P., Bobrovsky A.P., Efimochkin I.Yu., Bolshakova A.N. Spheroidization of powder compositions based on refractory metals (review). Part 1. *Trudy VIAM*, 2023, no. 1 (119), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 13, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-128-138.
10. Burkovskaya N.P., Bobrovsky A.P., Efimochkin I.Yu., Bolshakova A.N. Spheroidization of powder compositions based on refractory metals (review). Part 2. *Trudy VIAM*, 2023, no. 2 (120), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-101-112.
11. Elagin V.I. Promising granulated aluminum alloys. *Metallurgiya granul alyuminievykh splavov*, 1983, is. 2, pp. 3–84.
12. Bondarev B.I., Napalkov V.I., Tararyshkin V.I. *Modification of deformable aluminum alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1979, 214 p.
13. Kuznetsov A.O., Shadaev D.A., Konkevich V.Yu. et al. Modification of silumins – different approaches for one alloying system. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2014, no. 4, pp. 75–81.
14. Vasenev V.V., Osintsev O.E., Mironenko V.N. et al. Development of technology for producing stamped parts from SAC1-50 alloy for aerospace navigation devices and comparative testing of platform models from SAC1-50 and AMg6 alloys. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyenii*, 2016, no. 12, pp. 33–40.
15. Imametdinov E.S., Valueva M.I. Composites for piston engines (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.
16. Shchetinina N.D., Kuznetsova P.E., Dynin N.V., Selivanov A.A. Aluminum alloys with additions of Sc and Zr in additive manufacturing (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 15, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-19-34.
17. Osintsev O.E., Betzofen S.Ya., Vasenev V.V. et al. Study of the influence of kinetic and thermodynamic factors on the structure, properties and features of the technology for producing deformed semi-finished products from rapidly crystallized aluminum alloy of the Al–Si–Ni system. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2016, no. 3, pp. 57–64.
18. Osintsev O.E., Vasenev V.V., Mironenko V.N. et al. Development of degassing modes for powders and powder composites of Al–Si–Ni alloys and obtaining briquettes and deformed semi-finished products from them. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyenii*, 2016, no. 7, pp. 29–36.
19. Mironenko V.N., Nikonov K.I., Butrim V.N. et al. Fracture of Al–Si powder composites. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2009, no. 6, pp. 36–39.
20. Vasenev V.V., Mironenko V.N., Butrim V.N. et al. Development of technology for producing pressed semi-finished products and stampings from aluminum alloy SAC1-50 and study of their structure and physical and mechanical properties. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyenii*, 2015, no. 9, pp. 41–47.
21. Vasenev V.V., Kvitka E.V., Mironenko V.N. et al. Resistance to microplastic deformation of powder composite materials of the Al–Si system. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2008, no. 8, pp. 41–44.

22. Mironenko V.N., Vasenev V.V., Petrovich S.Yu., Myshlyaev I.V. Structure and properties of compact blanks and rods made of SAC1 alloy. *Tsvetnye metally*, 2018, vol. 4, p. 86.
23. Vasenev V.V., Mironenko V.N., Butrim V.N. et al. Development of the aluminium powder composite based on the Al–Si–Ni system and technology of billet fabrication of this composite. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2018, vol. 59, is. 6, pp. 677–684.
24. Mironenko V.N., Vasenev V.V., Vedernikova M.I. et al. Structure and mechanism of deformation of hypereutectic silumin stampings. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2017, no. 5, pp. 78–87.
25. *Aviation materials: a reference book in 13 vols.* Ed. E.N. Kablov. 7th ed., rev. and enlarged. Moscow: VIAM, 2008. vol. 4: Aluminum and beryllium alloys, part 1: Wrought aluminum alloys, book 2, pp. 154–155.

Информация об авторах

Нефедова Юлия Николаевна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кожекин Андрей Евгеньевич, заместитель начальника лаборатории, к.т.н. НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Скугорев Александр Викторович, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Селиванов Андрей Аркадьевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Yulia N. Nefedova, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey E. Kozhekin, Deputy Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander V. Skugorev, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey A. Selivanov, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 26.02.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 06.03.2025.
The article was submitted 26.02.2025; approved and accepted for publication after reviewing 06.03.2025.