

УДК 669.782'71.018.046.516.4:536.413.2

*М.В. Попова, А.Н. Прудников, С.В. Долгова, М.А. Малюх***Сибирский государственный индустриальный университет****ПЕРСПЕКТИВНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ И КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ***

Авиационная и космическая промышленность является одним из наиболее высокотехнологичных секторов экономики, развитие которого невозможно без разработки новых материалов и внедрения технологий их производства [1]. Для обеспечения конкурентоспособности отечественных изделий необходимо создание и применение материалов, обладающих высокими удельными свойствами и низкой плотностью [2].

Для авиационно-космической техники повышение весовой эффективности изделий является актуальной задачей, которая решается путем применения материалов пониженной плотности, прежде всего, алюминиевых сплавов. К современным сплавам для авиационной и космической техники предъявляют требования не только по механическим характеристикам и плотности, но и по теплофизическим свойствам, в частности, они должны иметь низкий коэффициент линейного расширения (КЛР) [3, 4]. В качестве авиационных материалов чаще всего используют деформируемые алюминиевые сплавы, легированные медью, цинком, магнием, марганцем и литием. Однако деформируемые сплавы на основе системы алюминий – кремний до настоящего времени не получили широкого распространения, несмотря на важные шаги, сделанные в этом направлении [5 – 9].

Сплавы системы Al – Si имеют весьма привлекательный комплекс свойств. Они легки ($\gamma = 2600 \div 2700 \text{ кг/м}^3$), немагнитны, обладают высокой коррозионной стойкостью практически во всех агрессивных средах, высокими твердостью и износостойкостью. Эти сплавы характеризуются хорошими литейными свойствами и герметичностью. Кремний, имеющий малый коэффициент линейного расширения, эффективно снижает КЛР алюминия. Многолетние исследования [10] особенностей теплового расширения сплавов Al – Si позволяют

утверждать, что увеличение содержания кремния и переход к сплавам на основе кремния обеспечивает снижение коэффициента линейного расширения в среднем на 10^{-6} К^{-1} на каждые 5 % кремния в интервале температур испытания 50 – 250 °С. Таким образом, КЛР сплавов Al – Si при увеличении содержания кремния от 10 до 50 % снижается с $22 \cdot 10^{-6}$ до $11 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ [10].

Большим достоинством и интересной особенностью этих сплавов является то, что они не склонны к хладноломкости, более того, в области отрицательных температур КЛР этих сплавов становится ниже, а механические свойства – выше, чем при комнатной температуре (так, например, при –203 °С прочность сплавов примерно на 20 % превышает прочность при 20 °С при сохранении пластичности) [11, 12]. Таким образом, сплавы системы алюминий – кремний могут сохранять свои свойства в широком температурном интервале: от –200 до 100 °С.

Применение сплавов на основе системы Al – Si как конструкционных материалов, а также в качестве сплавов специального назначения во многом определяется параметрами их микроструктуры. Кремний, введенный в расплав уже в количестве 6 – 7 %, склонен к ликвации и образованию первичных выделений кремнистой фазы, как правило, в виде крупных частиц. Поэтому свойства сплавов Al – Si зависят не только от их химического состава, но и от размеров, формы и характера распределения частиц кремнистой фазы. Эффективно управлять структурой, а, следовательно, и свойствами силуминов возможно с позиций «водородного материаловедения», предусматривающего разработку новых материалов и способов их получения, в которых водород играет важную функциональную роль [13 – 17].

Как было показано ранее [18, 19], применение различных способов подготовки шихты, обработки расплава и кристаллизации, увели-

* Работа выполнена под руководством профессора В.К. Афанасьева.

чивающих содержание атомарного водорода, позволяет получить однородную мелкодисперсную структуру заэвтектических силуминов. Это, в свою очередь, повышает их технологическую пластичность, что обеспечивает возможность проведения не только горячей, но и холодной пластической деформации с большой степенью нагартовки.

В соответствии с механизмом теплового расширения, согласно которому существует тесная связь между величиной КЛР и содержанием водорода в силуминах, коллективом авторов под руководством профессора В.К. Афанасьева были разработаны холоднодеформируемые сплавы системы Al – Si с низким КЛР, в состав которых в качестве легирующего элемента входит водород [20].

Разработанная серия деформируемых сплавов на основе алюминия содержит кремний и водород: 15 – 20 % Si; 0,00134 – 0,00259 % H;

остальное алюминий (по массе). Смесь компонентов для каждого сплава, составы которых приведены в табл. 1, плавил в алундовом тигле. Водород в расплав вводили с помощью обработки влажным асбестом с последующим выстаиванием в атмосфере водяных паров. При введении в расплав водород способствует увеличению числа центров кристаллизации и появлению в структуре затвердевших сплавов мелких равномерно распределенных кристаллов первичного кремния. Сплав с минимальным содержанием кремния (Al – 15 % Si) после обработки расплава, увеличивающей количество водорода, приобретает структуру неравновесной эвтектики. Рентгеноструктурный анализ показал, что формирование эвтектики в сплаве Al – 15 % Si приводит к увеличению периода решетки α -твердого раствора с 4,056 до 4,058 Å. Поскольку кремний и основные примеси, присутствующие в алюминии

Т а б л и ц а 1

Химический состав и физико-механические свойства холоднодеформированных сплавов Al – Si

Состав сплава, % (Al – остальное)	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$, в интервале температур испытания, °С			Механические свойства	
	20 – 100	100 – 150	150 – 200	σ_b , МПа	δ , %
15 Si – 0,00259 H	13,6	5,9	4,9	241	2,3
17 Si – 0,00193 H	12,5	6,2	5,7	236	2,3
18 Si – 0,00170 H	11,1	4,6	7,2	212	2,0
20 Si – 0,00134 H	10,6	3,3	5,1	194	1,6

технической чистоты, уменьшают период решетки алюминия, следует сделать вывод, что не происходит пересыщения α -твердого раствора кремнием, а образуется пересыщенный твердый раствор водорода. Кроме того, увеличение массовой доли водорода в сплаве уменьшает устойчивость кремнистой фазы и поэтому позволяет проводить пластическую деформацию без образования надрывов и трещин.

Слитки разработанных сплавов толщиной 15 – 20 мм подвергали прокатке со степенью деформации 90 – 95 %. Разработанные деформируемые сплавы на основе алюминия имеют значения КЛР (табл. 1), сравнимые с КЛР литых высококремнистых силуминов при температурах испытания 20 – 100 °С, и ниже в два – три раза при температурах испытания 100 – 200 °С.

Металлографический анализ показал, что введение водорода в состав сплавов в заданных пределах (0,00134 – 0,00259 %, что составляет 15 – 29 см³/100 г металла) способствует образованию эвтектической структуры

с малым количеством равномерно распределенных первичных кристаллов кремния, в результате чего становится возможной холодная пластическая деформация (рис. 1). Деформированные сплавы имеют еще более тонкодисперсную структуру. Средний размер эвтектических кристаллов составляет 4 – 8 мкм, размеры отдельных первичных кристаллов могут достигать 80 – 100 мкм (рис. 2).

Благодаря тонкодисперсному строению эвтектики и малому количеству первичных кристаллов кремния полиэдрической формы разрушение сплавов носит в основном вязкий характер. Фрактографические исследования проводили путем визуального анализа изломов и использовали растровый электронный микроскоп при увеличениях 1000 – 8000 (рис. 3). При визуальном осмотре излом выглядит как тонкокристаллический, имеющий бархатистое строение, а на микрофрактограммах видно, что участки вязкого разрушения с явно выраженным ямочным рельефом (рис. 3, в, е) чередуются

ются с небольшими участками скола по частицам кремнистой фазы (рис. 3, б, д).

В процессе пластической деформации происходит дополнительное дробление кремнистой фазы (рис. 3, б, д), в результате чего часть водорода из нее переходит в алюминий, образуя в нем пересыщенный твердый раствор внедрения, что, в свою очередь, приводит к снижению коэффициента линейного расширения и повышению механических свойств. Разработанные сплавы отличаются хорошим сочетанием прочностных и пластических свойств: $\sigma_b = 194 \div 241$ МПа, $\delta = 1,8 \div 2,3$ %. Последующая термическая обработка (закалка и старение) приводит к увеличению прочности при некотором уменьшении пластичности (табл. 2).

Разработанные сплавы имеют не только высокие прочностные свойства, но и хорошее сопро-

тивление усталостному разрушению. На рис. 4 представлены кинетические диаграммы усталостного разрушения сплавов Al – (15 – 20) % Si – H. Видно, что на ранних стадиях роста сопротивления распространению усталостной трещины сплавы с разным содержанием кремния различаются мало. Пороговый коэффициент интенсивности напряжений ΔK_{th} изменяется от 4,8 МПа·м^{1/2} (сплав Al – 20 % Si) до 5,3 МПа·м^{1/2} (сплав Al – 15 % Si). При переходе от стадии припорогового роста усталостной трещины к стадии стабильного ее распространения при скоростях, превышающих 10⁻⁸ м/цикл, различие в химическом составе сплавов сказывается более существенно. Наиболее высокие характеристики трещиностойкости наблюдали у сплава Al – 15 % Si – H, что объясняется

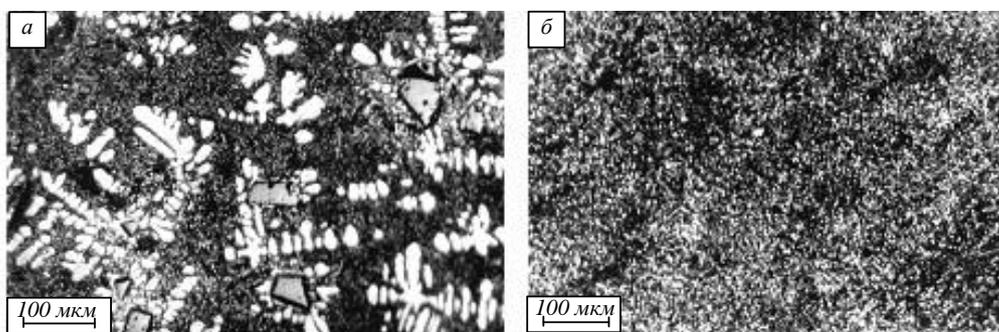


Рис. 1. Микроструктура сплава Al – 15 % Si:
а – обычное приготовление; б – продувка расплава водородом

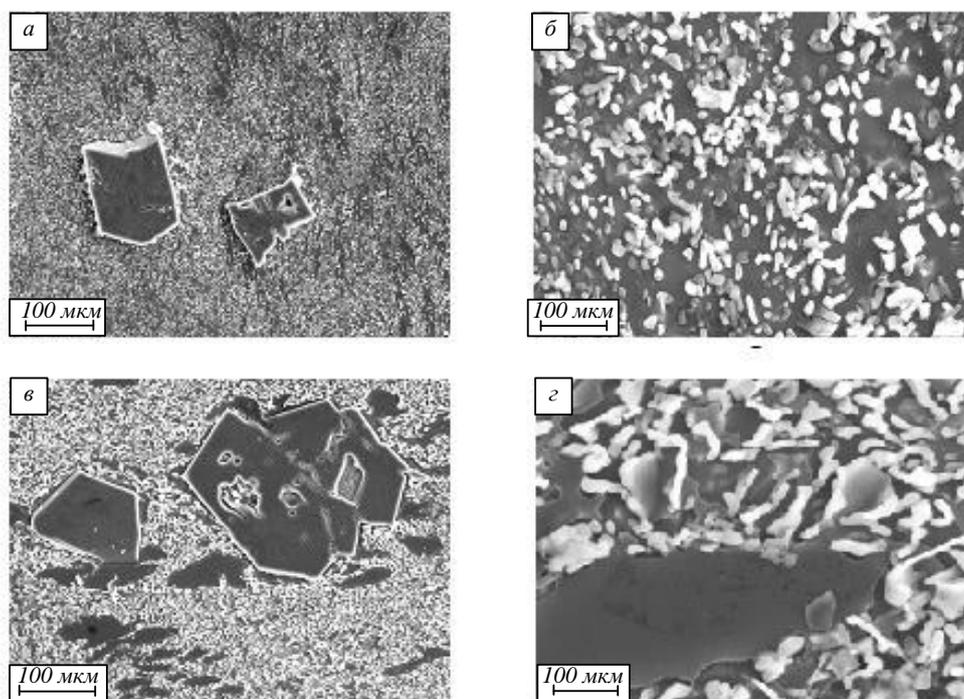


Рис. 2: Микроструктура сплава системы Al – 15 % Si – H (а, б); Al – 20 % Si – H (в, г)

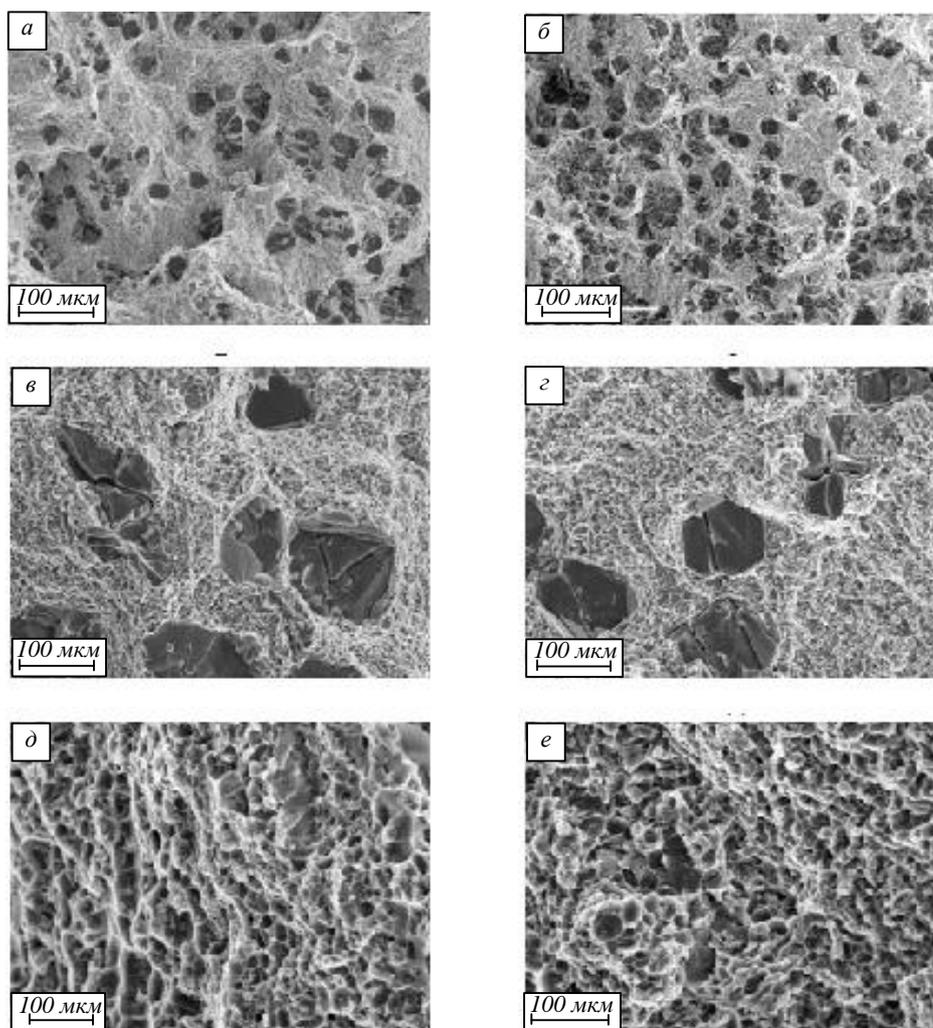


Рис. 3. Микрофрактограммы сплава Al – 15 % Si – H (а, в) и Al – 20 % Si – H (з, е)

Т а б л и ц а 2

Влияние термической обработки на механические свойства холоднодеформированного сплава Al – 15 % Si – H

Режим термической обработки	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %
–	160	241	2,3	10,5
Закалка с 530°C, в течение 1 ч, вода	165	246	2,0	9,6
Закалка с 530°C, в течение 1 ч, вода + старение 160°C, в течение 10 ч, воздух	169	251	1,5	11,4

лучшей морфологией его структуры. Для дальнейшего повышения прочности и пластичности при сохранении низкого коэффициента линейного расширения в сплавы на основе алюминия, содержащие кремний и водород, дополнительно вводили титан и никель при соотношении компонентов: 15,0 – 20,0 % Si; 0,05 – 0,40 % Ti; 0,40 – 0,80 % Ni; 0,00162 – 0,00270 % H; остальное алюминий (по массе).

Введение титана в состав в количестве 0,05 – 0,40 % (по массе) совместно с водородом (0,00162 – 0,00270 % или 18 – 30 см³/100 г ме-

талла) за счет дополнительного измельчения структурных составляющих повышает технологическую пластичность сплавов и их механические свойства. Никель также повышает прочность сплавов, сохраняя низкий коэффициент линейного расширения. Смесь компонентов для каждого из разработанных составов сплавов, приведенных в табл. 3, плавил в шахтной печи в алундовом тигле. Водород вводили с помощью обработки влажным асбестом. Слитки толщиной 15 – 20 мм подвергали холодной прокатке со степенью деформации 90 – 95 %. Из полу-

ченных заготовок вырезали образцы и изучали свойства сплавов. Результаты испытаний приведены в табл. 3. Как следует из приведенных данных, введение титана и никеля обеспечивает повышение прочности на 11 – 20 %, пластичности – на 30 – 56 % при сохранении значения коэффициента линейного расширения на том же уровне.

Выводы. Приведенные сведения о сплавах с низким коэффициентом линейного расширения наглядно показывают существование реальной возможности получения легких материалов, которые смогут конкурировать по величине КЛР со сплавами на основе железа и титана. Малая плотность деформируемых алюминий-кремниевых сплавов при достаточных механических свойствах обеспечит им широкое применение в различных областях машиностроения и, прежде всего, в авиационно-космической и приборной технике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года. – В кн.: Юбилейный науч.-технич. сб. «Авиационные материалы и технологии» (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). – М.: ВИАМ, 2012. С. 7 – 17.
2. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов. – В кн.: Юбилейный науч.-

технич. сб. «Авиационные материалы и технологии» (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). – М.: ВИАМ, 2012. С. 157 – 167.

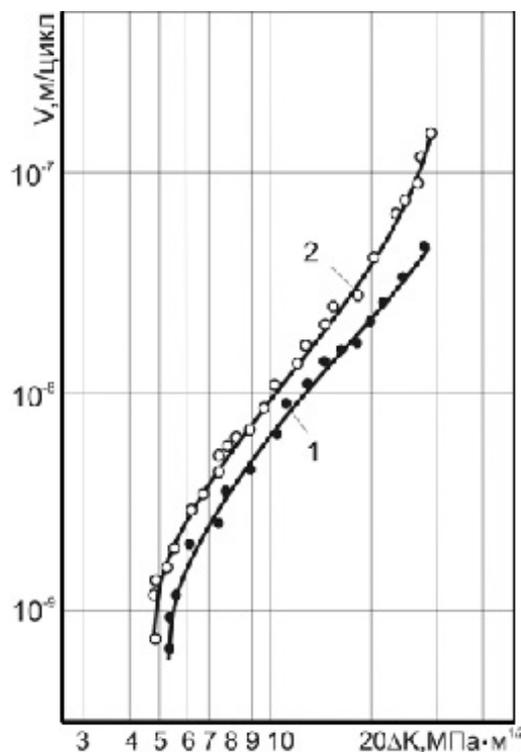


Рис. 4. Кинетические диаграммы усталостного разрушения разработанного сплава Al – (15 ± 20 %) Si – Ni при содержании кремния 15 % (1) и 20 % (2) при R = 0,1

Т а б л и ц а 3

Химический состав и физико-механические свойства и коэффициент линейного расширения сплавов Al – Si – Ni – Ti – Ni

Состав сплавов, % (Al - остальное)	Механические свойства		$\alpha \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$ в интервале температур испытания, °C		
	σ_b , МПа	δ , %	20 – 100	100 – 150	150 – 200
15 ± 20 Si – 0,00134 ± 0,00259 Ni	194 – 241	1,6 – 2,3	10,6 – 13,6	3,3 – 5,9	4,9 – 5,1
15 Si – 0,4 Ti – 0,6 Ni – 0,00207 Ni	275	3,6	13,3	5,9	4,9
18 Si – 0,2 Ti – 0,8 Ni – 0,00162 Ni	290	3,0	11,6	5,9	4,2
20 Si – 0,05 Ti – 0,4 Ni – 0,00270 Ni	267	3,2	10,7	4,0	4,3

3. Афанасьев В.К., Попова М.В. Перспективы развития легких сплавов с малым тепловым расширением для космической техники // *Металлургия машиностроения*. 2012. № 6. С. 8 – 13.
4. Афанасьев В.К., Попова М.В., Самонь В.А. О создании новых легких деформированных сплавов для космической техники // *Металлургия машиностроения*. 2014. № 5. С. 21 – 28.
5. Эскин Г.И., Артес А.Е., Панов Е.И., Бер Л.Б., Бочвар С.Г., Ялфимов В.И., Гуреева Т.В. Исследование технологии изготовления деформированных полуфабрикатов из заэвтектического силумина 01392 с использованием поперечно-винтовой прокатки // *Технология легких сплавов*. 2008. № 1. С. 83 – 89.
6. Эскин Г.И., Бочвар С.Г., Ялфимов В.И. Влияние технологии литья и деформации

- на структуру и свойства деформированных полуфабрикатов из заэвтектических силуминов. – В кн.: Материалы Всероссийской научно-технической конференции Новые материалы и технологии «НМТ-2008». Т. 1. – М.: МАТИ, 2008. С. 112, 113.
7. Эскин Г.И., Бочвар С.Г., Ялфимов В.И. Новые тенденции в технологии литья и деформирования заэвтектических силуминов // *Металлургия машиностроения*. 2009. № 4. С. 21 – 24.
 8. Афанасьев В.К., Прудников А.Н. Высокопрочный алюминиевый сплав для деталей узлов летательных аппаратов // *Металлургия машиностроения*. 2011. № 5. С. 31 – 34.
 9. Афанасьев В.К., Герцен В.В., Коровин Г.Т., Долгова С.В., Попова М.В. Водородная обработка расплава для увеличения деформируемости высококремнистых Al-сплавов // *Металлургия машиностроения*. 2015. № 4. С. 14 – 18.
 10. Афанасьев В.К., Горшенин А.В., Попова М.В., Прудников А.Н., Старостина М.А. О влиянии кремния на тепловое расширение алюминия // *Металлургия машиностроения*. 2010. № 6. С. 23 – 26.
 11. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. / Пер. с англ. – М.: *Металлургия*, 1979. – 640 с.
 12. Кошелев П.Ф., Беляев С.Е. Прочность и пластичность конструкционных материалов при низких температурах: справочное пособие. – М.: *Машиностроение*, 1967. – 364 с.
 13. Колачев Б.А. Водород в металлах и сплавах // *МиТОМ*. 1999. № 3. С. 3 – 11.
 14. Шаповалов В.И. Водород как новый легирующий элемент. – В кн.: Водородное материаловедение и химия гидридов металлов. Сборник тезисов VI международной конференции. – Украина, Ялта, 1999. С. 213.
 15. Афанасьев В.К. Некоторые итоги и перспективы металлургии // *Литейное производство*. 2000. № 3. С. 3 – 5.
 16. Goltsov V.A. Fundamentals of hydrogen treatment of materials. – In book: *Progress in Hydrogen Treatment of Materials*. – Donetsk-Coral Gables: Kassiopeya Ltd, 2001. P. 161 – 184.
 17. Афанасьев В.К. Водородная платформа периодической системы элементов. Часть II // *Металлургия машиностроения*. 2012. № 4. С. 3 – 8.
 18. Афанасьев В.К., Герцен В.В., Долгова С.В., Мусохранов Ю.М., Попова М.В. О влиянии водяного пара на формирование свойств высококремнистых Al-сплавов // *Металлургия машиностроения*. 2015. № 5. С. 17 – 1.
 19. Афанасьев В.К., Горшенин А.В., Долгова С.В., Самонь В.А., Попова М.В. Литье под давлением медистого силумина // *Литейное производство*. 2015. № 6. С. 22 – 26.
 20. Афанасьев В.К., Попова М.В., Прудников А.Н., Зезиков М.В., Горшенин А.В. Водород – легирующий элемент алюминиевых сплавов // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2005. № 6. С. 36 – 39.

© 2017 г. М.В. Попова, А.Н. Прудников,
С.В. Долгова, М.А. Малюх
Поступила 30 августа 2017 г.