

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»**

**НАУКА И МОЛОДЕЖЬ:
ПРОБЛЕМЫ, ПОИСКИ, РЕШЕНИЯ**

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ВЫПУСК 27

*Труды Всероссийской научной конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых
16 – 17 мая 2023 г.*

ЧАСТЬ I

Под общей редакцией профессора С.В. Коновалова

**Новокузнецк
2023**

ББК 74.48.288
Н 340

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, профессор Коновалов С.В.,
д-р физ.-мат. наук, профессор Громов В.Е.,
канд. техн. наук Шевченко Р.А.,
канд. техн. наук, доцент Темлянцева Е.Н.

Н 340

Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 16–17 мая 2023 г. Выпуск 27. Часть I. Естественные и технические науки / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Сибирский государственный индустриальный университет ; под общ. ред. С.В. Коновалова – Новокузнецк; Издательский центр СибГИУ, 2023. – 385 с. : ил.

ISSN 2500-3364

Представлены труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по результатам научно-исследовательских работ. Первая часть сборника посвящена актуальным вопросам в области естественных наук, металлургических процессов, технологий, материалов и оборудования, экологии, безопасности, рациональному использованию природных ресурсов.

Материалы сборника представляют интерес для научных и научно-технических работников, преподавателей, аспирантов и студентов вузов.

ISSN 2500-3364

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2023

ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЕ РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ <i>Пимахин А.В., Осколкова Т.Н.</i>	218
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ГОМОГЕНИЗАЦИИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРАНСФОРМАЦИИ ФАЗЫ Al_5FeSi В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СЛИТКАХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Mg-Si <i>Коробейников Д.В., Попова М.В.</i>	223
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВА AL-15% SI ПОСЛЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ВОДОРОДОМ <i>Ломиворотов Н.П., Попова М.В.</i>	228
АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СИЛУМИНОВ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СОСТАВА <i>Ломиворотов Н.П., Полунин А.М., Попова М.В.</i>	234
ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛОГРАФИИ И ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ МЕДИСТЫХ СИЛУМИНОВ <i>Полунин А.М., Попова М.В.</i>	240
ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВОВ Al-Mg-Si <i>Попова М.В., Михеева М.В., Караваева К.А.</i>	245
ВЛИЯНИЕ ВИДА ДЕФОРМАЦИИ НА СВОЙСТВА ЗАГОТОВОК ИЗ ЛЕГИРОВАННОГО ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА <i>Прудников В.А., Рексиус В.С., Прудников А.Н.</i>	250
СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СЛИТКОВ И ПРЕССОВОК ИЗ ЛЕГИРОВАННОГО ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА <i>Прудников В.А., Шелтреков М.О., Прудников А.Н.</i>	253
ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ <i>Алексеева Е.А., Кибко Н.В.</i>	257
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ПОРОШКОВЫХ ПРОВОЛОК <i>Михно А.Р., Махнев И.А., Крюков Р.Е., Панченко И.А.</i>	260
5D-ПЕЧАТЬ. АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО <i>Коток М.М., Коновалов С.В., Панченко И.А.</i>	264
III ЭКОЛОГИЯ. БЕЗОПАСНОСТЬ. РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ	266
ВСКРЫШНЫЕ ПОРОДЫ УГЛЕДОБЫЧИ – ПЕРСПЕКТИВНОЕ СЫРЬЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ <i>Царева Е.Е., Коротков С.Г.</i>	266
АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАЩЕНИЯ СО ВСКРЫШНЫМИ ПОРОДАМИ <i>Царева Е.Е., Коротков С.Г.</i>	270
МАЛАКОФАУНИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ – КАК ОДИН ИЗ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ И КОРРЕЛЯЦИИ ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ <i>Лысенко Н.Е., Тетерина И.И.</i>	273

потребителей. Коэффициент трансформации, получаемый при таких параметрах, имеет стабильный характер и составляет от 90 % и выше.

Библиографический список

1. Алюминий. Свойства и физическое металловедение: справ. изд. / Под ред. Хэтча Дж. Е. – Москва: Металлургия, 1989. – 422 с.
2. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. – 4-е изд. – Москва : МИСИС, 2005. – 432 с.
3. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л.Ф. Мондольфо. – Москва : Металлургия, 1979. – 640 с.
4. Колобнев И.Ф. Термическая обработка алюминиевых сплавов / И.Ф. Колобнев. – Москва : Металлургиздат, 1961. – 413 с.

УДК 669.715'788.017

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВА AL-15% SI ПОСЛЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ВОДОРОДОМ

Ломиворотов Н.П., Попова М.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: pddcull100@mail.ru*

В данной работе приведены результаты исследования обработки расплава водородом на структуру, плотность и твердость сплава Al-15% Si. Исследовано влияние различных способов введения водорода в расплав. Установлено, что продувка расплава водородом при 900 °С в течение 10 мин обеспечивает наилучший эффект модифицирования структуры и повышение физико-механических свойств.

Ключевые слова: силумин, обработка расплава, водород, микроструктура, ТКЛР, плотность, твердость.

В настоящее время для силуминов Al-15% Si существуют различные модифицирующие виды обработки. Наиболее распространенные из применяемых модификаторов – натрий, стронций, фосфор и его соединения. Все они, помимо положительного воздействия на сплав, имеют также и свои недостатки, отчего у исследователей нет единого мнения о том, какой из модификаторов использовать более целесообразно [1–10]. Разработаны также способы модифицирования силуминов, которые предусматривают обработку расплава газообразными веществами [11–16]. В связи с этим целью данной работы было изучение влияния обработки расплава на структуру и свойства силумина Al–15% Si с помощью различных методов наводороживания: обработка влажным асбестом, выстаивание в атмосфере водяного пара и продувка водородом. После всех видов обработки и отстаивания расплава в течение 5 минут, проводили заливку в холодный алюминиевый кокиль (ско-

рость охлаждения $\sim 60\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$).

Металлографический анализ проводили с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 при увеличениях 100 и 500. Содержание атомарного водорода в образцах определяли методом вакуум-нагрева. Для определения плотности использовали метод гидростатического взвешивания на аналитических весах АДВ-200М, а микротвердость измеряли на цифровом микротвердомере HVS-1000А. Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) определяли с помощью дифференциального оптического дилатометра Шевенара в интервале температур $20\text{--}450\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Сравнительный качественный, а затем и количественный металлографический анализ показал, что наводороживающая обработка расплава может привести к существенному улучшению параметров структуры сплава Al-15% Si (таблица 1, рисунок 1). Микроструктура сплава обычного приготовления (рисунок 1, а) представляет собой крупно игольчатую эвтектику, кристаллы первичного кремния (КПК) полиэдрической формы и довольно больших размеров, а также дендриты α -твердого раствора, появившиеся по причине неравновесных условий кристаллизации.

Таблица 1 – Зависимость содержания водорода и параметров микроструктуры сплава Al-15%Si от способов обработки расплава

Способ обработки расплава	Морфология эвтектики	Объемная доля эвтектики, %	Размер структурных составляющих, мкм			Содержание водорода [H], $\text{см}^3 / 100\text{ г Me}$
			Эвтектический кремний	КПК	дендриты α -твердого раствора	
Без обработки	Крупно игольчатая, слабо модифицированная	47	30–60	80–120	210–440	0,3
Обработка расплава влажным асбестом	Средне игольчатая, частично модифицированная	53	12–50	70–100	180–320	0,9
Выстаивание расплава в атмосфере водяного пара	Мелкозернистая, модифицированная	67	3–5	45–50	100–150	1,3
Продувка расплава водородом	Мелкозернистая, модифицированная	92	0,5–2,0	5–10	–	1,6

Обработка расплава влажным асбестом, увеличивающая содержание диффузионно-подвижного водорода в сплаве с $0,3 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ до $0,9 \text{ см}^3/100 \text{ г}$, способствует диспергированию частиц эвтектического кремния с сохранением их игольчатой формы, а также уменьшению размеров дендритных ячеек α -твердого раствора. Дополнительно происходит некоторое уменьшение размеров КПК, а также увеличение объемной доли эвтектики с 47 до 53% (таблица 1).

Более эффективное модифицирующее воздействие оказывают выстаивание расплава в атмосфере водяного пара и продувка расплава водородом, увеличивающие содержание диффузионно-подвижного водорода в сплаве до 1,3 и 1,6 $\text{см}^3/100 \text{ г}$ металла соответственно. Однако увеличение количества определяемого водорода не сопровождается порообразованием, т.к. водород при кристаллизации расплава практически весь фиксируется в твердом растворе. Оба эти способа введения водорода в расплав обеспечивают диспергирование как эвтектического, так и первичного кремния в структуре сплава Al-15% Si. При этом они положительно влияют на морфологию эвтектики и увеличивают ее объемную долю (таблица 1). Так, после выстаивания расплава в атмосфере водяного пара в структуре силумина наблюдается эвтектика только мелкозернистого строения, объемная доля которой увеличивается с 53 до 67 %.

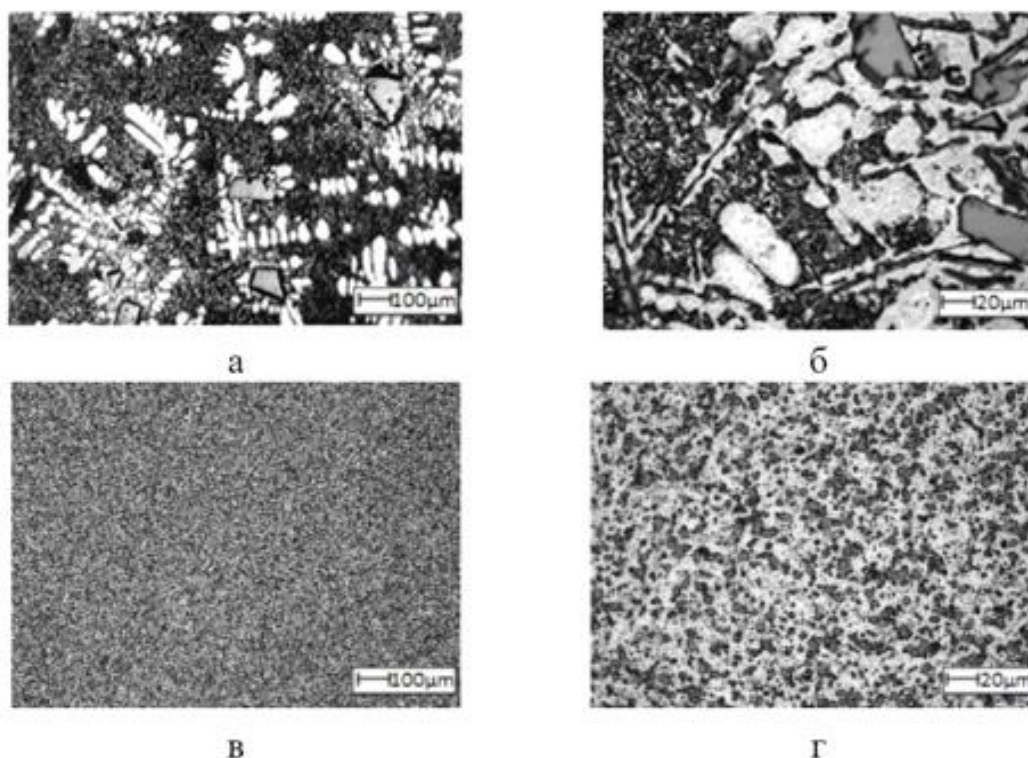


Рисунок 1 – Влияние обработки расплава на микроструктуру сплава Al-15%Si: а, б – без обработки; в, г – продувка водородом

Металлографические исследования позволили установить, что наилучший эффект модифицирования структуры обеспечивает продувка водородом (рисунок 1, в, г). Она приводит к резкому уменьшению размеров

кремнистой фазы, при этом существенно увеличивает объемную долю эвтектики с 47 до 92% и уменьшает объемную долю первичных кристаллов кремния с 19,8 до 8%. Кроме того, в структуре отсутствуют неравновесные дендриты α -твердого раствора.

Таким образом, продувка расплава водородом позволяет получить высоко модифицированную структуру, состоящую в центре слитка преимущественно из эвтектики тонкого строения, а в периферийных зонах слитка – из тонкодисперсной эвтектики и мелких КПК, присутствующих в небольшом количестве.

Эффект одновременного измельчения эвтектического и первичного кремния можно объяснить с помощью известного механизма формирования выделений кремнистой фазы при кристаллизации заэвтектических силуминов в присутствии водорода [17]. Воздействие диффузионно-подвижного водорода приводит не только к увеличению числа центров кристаллизации кремнистой фазы, но и затрудняет рост КПК.

Были изучены физико-механические свойства образцов из сплава Al-15%Si после модифицирования путем продувки расплава водородом. На основании проведенных исследований установлено, что продувка расплава водородом способствует уменьшению плотности сплава и повышению микротвердости КПК. Благодаря увеличению микротвердости КПК увеличивается общая твердость сплава (таблица 2).

Таблица 2 – Влияние продувки водородом на физико-механические свойства сплава Al–15% Si

Вид обработки	Плотность ρ , кг/м ³	Твердость, НВ	Микротвердость НВ		
			КПК	дендриты α -твердого раствора	эвтектика
Без обработки	2639	80	418	42	55
Продувка водородом	2603	87	462	отсутствуют	56

Положительный эффект наводороживания расплава зависит как от правильного выбора способа введения водорода в расплав и длительности обработки расплава, так и от температуры наводороживания. Поэтому исследовали влияние температуры наводороживания 900 °С и 800 °С (время наводороживания 10 минут) на значения ТКЛР.

Установлено, что наводороживание по обоим изученным режимам приводит к снижению ТКЛР в интервале температур испытания 50–200 °С, но при более высоких температурах испытания (400–450 °С) существенно повышает ТКЛР до значений $\alpha = 21,1 - 21,6 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ (таблица 3). Однако наводороживание расплава при температуре 900 °С по сравнению с 800 °С, более существенно снижает ТКЛР сплава Al–15% Si при низких температу-

рах испытания 50–100 °С, вплоть до значений $(15,7–17,2) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, тогда как у сплава обычного приготовления $\alpha = 18,0–18,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Таким образом, для сплава Al-15%Si лучшими параметрами модифицирующей обработки являются: температура продувки расплава 900 °С, время продувки 10 минут.

Таблица 3 – Влияние температуры продувки расплава водородом на ТКЛР сплава Al-15% Si

Температура продувки расплава	ТКЛР, $\alpha \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$ при температуре испытания, °С								
	50	100	150	200	250	300	350	400	450
–	18,0	18,4	18,5	18,8	19,0	19,3	19,7	18,5	18,0
800°С	17,0	18,2	18,3	18,6	18,8	20,9	21,2	21,6	20,0
900 °С	15,7	17,2	18,2	18,8	19,4	20,9	21,2	20,7	21,1

Закключение. Изучено влияние различных видов обработки расплава, увеличивающих содержание водорода в сплаве Al–15%Si, на параметры его микроструктуры и физико-механические свойства. Установлено, что при увеличении содержания диффузионно-подвижного водорода в сплаве с 0,3 до 1,3–1,6 см³ / 100 г происходит модифицирование всех структурных составляющих, а именно, уменьшение их размеров, изменение морфологии и более равномерное распределение по объему сплава.

Показано, что продувка расплава водяным паром при 900 °С в течение 10 мин обеспечивает наилучший эффект модифицирования структуры. Полученная структура представляет собой тонкодисперсную эвтектику и небольшое количество мелких КПК. Такие структурные изменения приводят к улучшению свойств сплава Al–15%Si: происходит уменьшение значений ТКЛР ($\bar{\alpha}_{50-100} = 16,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), уменьшение плотности с 2639 до 2603 кг/м³, увеличение твердости с 80 до 87 НВ.

Библиографический список

1. Напалков В.И. Модифицирование алюминиевых сплавов / В.И. Напалков, С. В. Махов., А. В. Поздняков. – Москва: МИСИС, 2017. – 347 с.
2. Афанасьев В.К. Новые способы обработки жидких сплавов алюминия с 30-50% кремния / В.К. Афанасьев, М.В. Попова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2001. – № 2. – С. 29-31.
3. Белов В. Д. Поршневые силумины / В.Д. Белов // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2005. – №1 (9). – С 32-34.
4. Попова М.В. Наследственное влияние обработки шихты и расплава на терморасширение заэвтектических силуминов / М.В. Попова, А.А. Ружило // Литейное производство. – 2000. – № 10. – С. 4-6.
5. Гарибян Г.С. Влияние фосфидов на структуру и свойства заэвтектических силуминов / Г.С. Гарибян, В.П. Расщупкин, И.В. Зюзько // Омский

научный вестник. – 2010 – №2 (90). – С 64-65.

6. Ушакова В.В. О влиянии обработки расплава на линейное расширение сплавов Al -20÷40% Si / В.В. Ушакова, М.В. Попова, З.А. Лузянина // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1995. – № 4. – С. 69.

7. Скоробагатько Ю.П. Модифицирование заэвтектических алюминиевых сплавов с применением активных добавок / Ю.П. Скоробагатько // Металл и литье Украины. – 2009. – № 9. – С.19-28.

8. Стеценко В.Ю. О модифицировании доэвтектических и эвтектических силуминов / В.Ю. Стеценко // Литье и металлургия. – 2008. – №1. – С. 149–150.

9. Кузнецов А.О. Модифицирование силуминов – разные подходы для одной системы легирования / А.О. Кузнецов, Д.А. Шадаев, В.Ю. Конкевич, С.Т. Бочвар, Т.М. Кунявская // Технология легких сплавов. – 2014. – №4. – С. 75–81.

10. Афанасьев В.К. Новый модификатор для алюминиевых сплавов с высоким содержанием кремния / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, А.Н. Прудников, М.М. Сагалакова // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2021. – Т. 8. – № 1-2. – С. 84-91.

11. Борисов Г.П. О роли водорода в формировании структуры и свойств алюминиевых сплавов // Металлургия машиностроения. – 2005. – № 5. – С. 11–20.

12. Афанасьев В.К. О влиянии водяного пара на формирование свойств высококремнистых Al-сплавов / В.К. Афанасьев, В.В. Герцен, С.В. Долгова, Ю.М. Мусохранов, М.В. Попова // Металлургия машиностроения. – 2015. – № 5. – С. 17–21.

13. Гольцова М.В. Водородные технологии в литье и металлургии: настоящее и будущее (обзор) / М.В. Гольцова // Литье и металлургия. – 2018. – №4 (93). – С. 145–154.

14. Афанасьев В.К. Об участии водорода в формировании свойств заэвтектических сплавов Al-Si / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, М.А. Малюх, С.В. Долгова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20. – № 2. – С. 63-74.

15. Афанасьев В.К. Влияние обработки расплава водяным паром на тепловое расширение сплавов Al-20...40% Si / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, С.В. Долгова, А.В. Горшенин, М.А. Малюх // Металлург. – 2019. – № 1. – С. 71–76.

16. Афанасьев В.К. Воздействие водорода на структуру и свойства заэвтектического силумина с 15% кремния / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, А.Н. Прудников // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2022. – №6 (804). – С. 10–16.

17. Афанасьев В.К. Водород и деформируемые сплавы Al – 1÷50 % Si / В.К. Афанасьев, М.Н. Чурик, М.В. Попова [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 354 с.