

**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

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СПЛАВОВ Al-Mg-Si

Попова М.В., Михеева М.В., Караваева К.А.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, e-mail: m.popova@rdtc.ru*

Представлен обзор научных публикаций, посвященных изучению влияния магния совместно с кремнием на свойства алюминиевых сплавов типа авиаль (6XXX). Проведен анализ влияния легирующих элементов на особенности структуры, прочность, пластичность и коррозионную стойкость сплавов. Показаны области применения авиалей.

Ключевые слова: авиали, кремний, магний, железосодержащие интерметаллиды, технологическая пластичность, гомогенизация.

Алюминиевые сплавы являются широко распространенными конструкционными материалами, объемы применения которых в промышленности постоянно увеличиваются. Номенклатура промышленных алюминиевых сплавов велика, но среди них особое место занимают среднепрочные термически упрочняемые деформируемые сплавы системы Al-Mg-Si (авиали) [1, 2]. Более 90 % от общего объема прессованных изделий из алюминиевых сплавов изготавливается именно из этих этой группы. Это объясняется высокой пластичностью авиалей как в горячем, так и в холодном состоянии и возможностью получать детали сложной формы, в том числе со сложными поперечными сечениями. Кроме того, сплавы системы Al-Mg-Si отличаются значительной коррозионной стойкостью, удовлетворительной механической прочностью и свариваемостью, хорошей технологичностью [3–6]. Авторы [7] установили, что сплавы системы Al-Mg-Si (алюминиевые сплавы серии 6XXX) характеризуются не только хорошими прочностными свойствами и коррозионной стойкостью, улучшенной свариваемостью, но также снижением остаточных напряжений в крупногабаритных пластинах и листовых изделиях.

Важно то, что магний не только повышает прочностные свойства алюминия после пластической деформации, но и делает возможным упрочнение после закалки и старения [2, 8]. Кремний в сочетании с магнием обеспечивает малую плотность и высокую коррозионную стойкость сплавов этого типа. Увеличение содержания легирующих элементов позволяет получить на основе этой системы легирования легкие сплавы со специальными свойствами, в частности, с низким температурным коэффициентом линейного расширения [9–11]. Имеется большое количество научных публикаций, подтверждающих активное участие водорода в формировании структуры и служебных свойств алюминиевых сплавов, получаемых различными способами [12–17]. В работах [16, 17] изучено влияние водорода на поведение сплавов Al-Mg-Si в условиях усталостных испытаний. Показано, что введение добавок меди

снижает склонность сплавов Al-Mg-Si к наводороживанию в процессе усталостных испытаний, при этом не образуются областей охрупчивания.

Химический состав промышленных сплавов системы Al-Mg-Si в нашей стране соответствует ГОСТ 4784-74 и ОСТ 1.90048-72. За рубежом состав промышленных сплавов соответствует EN 573-3. Все промышленные сплавы системы Al-Mg-Si имеют суммарное содержание легирующих элементов от 1 до 2%. В настоящее время в международном реестре насчитывают около 100 марок сплавов этого типа. Причина такого многообразия в том, что часто производитель корректирует химический состав сплава в зависимости от его конкретного применения [18].

Например, в сплаве 6060 отношение Si/Mg более высокое, чем у сплавов 6063 и АД31. Содержание кремния во всех сплавах примерно одинаково, а содержание магния в сплаве 6060 значительно ниже: 0,35-0,60 вместо 0,45-0,90 %.

В 2000 году в ГОСТ 4784-74 были внесены изменения, из-за которых в сплаве АД31 появилось больше примесей. Максимальное содержание железа в сплаве АД31 может быть равно 0,50 %, тогда как у сплава 6060 оно равно 0,30%, у сплава 6063 – 0,35 % Fe. Более высокое содержание допустимых примесей, в первую очередь, железа, позволило использовать для выплавки вторичный алюминий. Но, с другой стороны, увеличение содержания железа приводит к охрупчиванию вследствие наличия нерастворимых железосодержащих интерметаллидов игольчатой формы.

В состав сплавов системы Al-Mg-Si (авиали, сплавы 6XXX) кроме основных компонентов входят также марганец, медь и хром. Эти легирующие элементы необходимы для повышения коррозионной стойкости, исключения потери прочности в результате вылеживания, а также для дополнительного упрочнения авиалей после естественного и искусственного старения. Марганец и хром препятствуют также зернограницному охрупчиванию вследствие выделения интерметаллидных частиц по границам зерен в процессе старения.

Многие сплавы Al-Mg-Si содержат медь ($Cu \leq 0,10\%$). Медь, находясь в твердом растворе, дополнительно повышает прочность сплавов, однако после искусственного старения увеличивает чувствительность к межкристаллитной коррозии. Поэтому современные авиали условно делят на две группы: содержащие меди не более 0,5 % и с добавками меди в количестве 0,5–1,5 % [18].

К сплавам первой группы относятся АД31, 6063, 6060. Они имеют невысокую прочность ($\sigma_b = 190$ МПа), но очень высокую технологическую пластичность, что позволяет обеспечивать большие скорости истечения металла (30–60 м/мин) при горячем прессовании и получать тонкостенные полые полуфабрикаты сложной конфигурации с хорошим качеством поверхности (рисунок 1). Еще одно достоинство данных сплавов – весьма низкая критическая скорость закалки, которая позволяет закаливать профили на желобе пресса в процессе естественного охлаждения на воздухе [18].

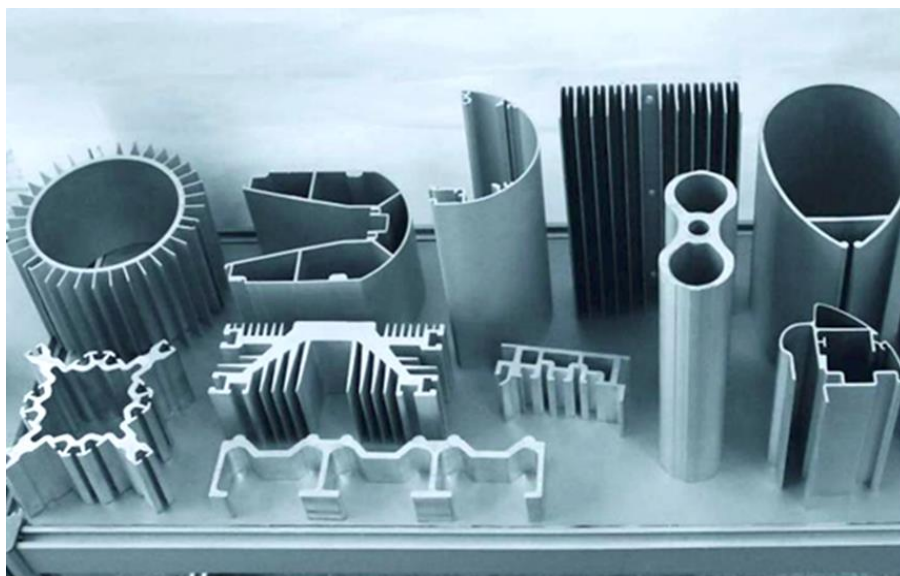


Рисунок 1 – Примеры прессованных изделий из сплавов серии 6XXX

Сплавы второй группы, такие как АД33, АД35, АВ, 6061, 6082 и т. д. имеют более высокие прочностные свойства ($\sigma_b = 240\text{--}270$ МПа), однако меньшую технологическую пластичность и коррозионную стойкость. Сплавы этой группы применяют в наземном транспорте взамен сталей, что позволяет снизить массу конструкции, уменьшить расход топлива, улучшить экономические показатели и экологичность транспортных средств.

Особенностью системы Al-Mg-Si является то, что магний и кремний образуют интерметаллидную фазу Mg_2Si , выделение которой из пересыщенного твердого раствора обеспечивает упрочнение сплавов после закалки ($515\text{--}525^\circ\text{C}$ и охлаждение в воде) и последующего искусственного старения ($160\text{--}170^\circ\text{C}$, выдержка 10–12 ч) [2]. Кроме основной упрочняющей фазы Mg_2Si уровень механических свойств авиалей зависит от интерметаллидов, которые могут быть образованы при участии других легирующих элементов, например, меди, марганца и хрома ($\text{Al}_x\text{Mg}_5\text{Cu}_4\text{Si}_4$, $\text{Al}_{10}\text{Mn}_2\text{Si}$, AlCrFeSi , AlSiMnFe), а главное – от наличия железосодержащих интерметаллидов. Дело в том, что даже малое содержание железа, ввиду его очень малой растворимости в алюминии в твердом состоянии вызывает появление железосодержащих фаз игольчатой формы, которые расположены по границам зерен твердого раствора и дендритных ячеек. К ним относятся фаза $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ скелетной формы серого цвета, фаза Al_5FeSi иглообразной или пластинчатой морфологии, а также фаза $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ шрифтообразной формы.

Особенно опасное снижение механических свойств происходит при содержании железа в сплавах в количестве 0,5–0,7 %.

Таким образом, в литом состоянии границы зерен и дендритных ячеек окаймлены первичными выделениями интерметаллидов, что делает сплав более хрупким. Прессование слитков в таком состоянии будет сопровождаться высоким сопротивлением деформации и недостаточной пластично-

стью металла при экструзии, так же приводить к возникновению на поверхности профиля различных дефектов.

Для повышения производительности процесса производства прессованных полуфабрикатов и изделий слитки сплавов системы Al-Mg-Si подвергают гомогенизационному отжигу с регламентированным охлаждением. Его назначение – повышение технологической пластичности слитков за счет формирования в структуре сплава компактных частиц интерметаллидных фаз. Однако оптимальные режимы гомогенизационного отжига применительно к конкретным условиям производства могут существенно различаться как по температуре, так и по времени изотермической выдержки, а более всего – по скорости охлаждения. В связи с этим режимы гомогенизационного отжига необходимо совершенствовать как для повышения прессуемости слитков, так и для сокращения общего времени гомогенизации.

В настоящее время деформируемые термически упрочняемые алюминиевые сплавы серии 6XXX системы Al-Mg-Si) широко применяются во многих отраслях современной промышленности, таких как авиастроение (малонагруженные узлы самолетов, различные детали арматуры гидравлических систем, внутренняя декоративная отделка кабин самолетов и вертолетов), строительство (оконные блоки, магазинные входные группы, межкомнатные перегородки), машиностроение (детали машиностроительных линий, трубы разных видов), транспорт (кузовные детали грузовиков, изделия для внутреннего обустройства железнодорожных вагонов) и другие.

Библиографический список

1. Промышленные алюминиевые сплавы: справ. изд./ С.Г. Алиева, М.Б. Альтман, С.М. Амбарцумян [и др.]. – Москва: Металлургия, 1984.–528 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. Dahle A.K., Lee Y.C., Nave M.D., Schaffer P.L., StJohn D.H.. Development of the as cast microstructure in magnesium-aluminium alloys, *Journal of Light Metals*, 2001. – Vol. 1. – Issue 1. – P. 61–72.
4. S. Toros, F. Ozturk, I. Kacar. Review of warm forming of aluminum–magnesium alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 207, issues 1–3, p. 1–12.
5. B. Milkereita, M.J. Starinka. Quench sensitivity of Al–Mg–Si alloys: A model for linear cooling and strengthening, *Materials & Design*, 2015, vol. 76, p. 117–129.
6. Chang-Yeol Jeong. High Temperature Mechanical Properties of Al-Si-Mg-(Cu) Alloys for Automotive Cylinder Heads // *Materials Transactions* – Vol. 54. – 2013. – №. 4. – P. 588-594.
7. Ehrstrom J, Warner T. Metallurgical design of alloys for aerospace structures // *ICAA 7*. – 2000. – V.1. – P. 5–16.

8. Афанасьев В.К. Перспективы развития легких сплавов с малым тепловым расширением для космической техники / В.К. Афанасьев, М.В. Попова // *Металлургия машиностроения*. – 2012. – № 6. – С. 8 – 13.
9. Ушакова В.В. О влиянии магния на линейное расширение силуминов / В.В. Ушакова, П.Б. Рудаева, М.В. Попова // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 1996. – № 4. – С. 45-46.
10. Afanas'ev V.K. Effect of alloying on the thermal expansion of aluminum / V.K. Afanas'ev, M.V. Popova, A.A. Ruzhilo, V.F. Frolov. – *Russian metallurgy (Metally)*. – 2002. – № 6. – P. 539-544.
11. Афанасьев В.К. Алюминиевые сплавы с высоким содержанием кремния и магния. Часть I. Al-11÷30%Si+5÷30%Mg // В.К. Афанасьев, С.В. Долгова, М.В. Попова, М.А. Малюх, В.В. Герцен, А.В. Горшенин // *Металлургия машиностроения*. – 2016. – № 2. – С. 10-15.
12. Афанасьев В.К. Водород и деформируемые сплавы Al – 1÷50 % Si / В.К. Афанасьев, М.Н. Чурик, М.В. Попова, С.В. Долгова, С.А. Гладышев, А.В. Горшенин, В.А. Самонь, В.В. Герцен. – под научн. ред. проф. Афанасьева В.К. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 354 с.
13. 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.
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. Horikawa K., Yamada H., Kobayachi H. Hydrogen Evolution during Fatigue Deformation in 6061 and 7075 Aluminium Alloys // *Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys. Yokohama*. – 2010. – P. 371–376.
17. Ichitani K., Koyama K. Effect of Experimental Humidity on Fatigue Fracture of 6XXX-series Aluminium Alloys // *Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys. Yokohama*. – 2010. – P. 363–370.
18. Бенариев И. Тенденции развития деформируемых сплавов системы Al–Mg–Si–(Cu). Часть 1 (обзор) / И. Бенариев, Л.Б. Бер, К.В. Антипов, С.В. Сбитнева // *Авиационные материалы и технологии*. – 2019. – №3 (56). – С. 14–22.