

**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

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СИЛУМИНОВ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СОСТАВА

Ломиворотов Н.П., Полунин А.М., Попова М.В.

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

Представлен обзор исследований по модифицированию силуминов заэвтектического состава с целью повышения физических и механических свойств. Проведен анализ модификаторов, относящихся к первой и второй группе, а также влияние на расплав операций по наводороживающей обработке и модификаторов комплексного состава.

Ключевые слова: заэвтектические силумины, модифицирование, микроструктура, эвтектика, кремний, механические свойства.

Большой резерв повышения механических свойств сплавов системы Al-Si заключается в разработке и применении различных методов модифицирования их структуры с целью уменьшения размеров структурных составляющих и их более равномерного распределения по сечению слитка или отливки. Актуальность проблемы обусловлена тем, что до настоящего времени не создано единой теории модифицирования силуминов, на основе которой возможен обоснованный выбор состава модификатора и режима модифицирования.

Модифицирование для силуминов является обязательной технологической операцией, поскольку при одном и том же химическом составе сплава позволяет обеспечить повышение механических свойств, в частности, прочности, в 2–5 раз [1–3]. Эффект модифицирования сплавов можно оценивать либо непосредственно по влиянию на структуру, либо косвенно – по влиянию на механические или физические свойства, в частности, на величину температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) [4–6].

Заэвтектические силумины с содержанием кремния 20 % и выше используются как специальные сплавы приборной техники, для которых важны не только высокие механические свойства, но и регламентируются некоторые физические свойства, например, плотность и тепловое расширение. В связи с этим целью настоящей работы является оценка современного состояния проблемы модифицирования силуминов как фактора повышения их физико-механических свойств.

Все модификаторы принято разделять на две группы [1]. К первой группе относятся модификаторы, которые в расплаве образуют высокодисперсную коллоидную взвесь и увеличивают число центров кристаллизации. Во вторую группу входят модификаторы, поверхностно активные частицы которых адсорбируются на гранях зародившихся кристаллов новой фазы и

уменьшают скорость их роста.

Для силуминов заэвтектического состава важнейшими структурными составляющими являются кристаллы первичного кремния (КПК) и эвтектика ($\alpha + \text{Si}$). Без применения модификаторов структура сплавов, содержащих 15-40 % кремния, характеризуется наличием крупных грубых ППК пластинчатой формы и крупноигольчатой эвтектики. Для модифицирования эвтектического кремния используют поверхностно-активные вещества, а для модифицирования КПК наиболее действенны тугоплавкие соединения.

Модифицирование натрием создает эффект измельчения зерна, поскольку он располагается на поверхности кластеров, служащих центрами кристаллизации, и препятствует присоединению атомов к ним из разупорядоченной зоны. Сфероидизация кристаллов способствует повышению механических свойств сплавов [1, 7, 8].

Однако модифицирование силуминов натрием и его солями имеет недостатки: вероятность образования частично модифицированной или перемодифицированной структуры; уменьшение жидкотекучести расплава; повышенная склонность к газопоглощению. Наиболее существенным недостатком является ограниченное время допустимой выдержки расплава после ввода модификатора – до 30 мин, что связано с испарением и окислением легкоплавкого натрия.

Добавление стронция вызывает измельчение эвтектики ($\alpha + \text{Si}$) и обеспечивает стабильный эффект модифицирования расплава при длительном выстаивании до 6 ч и многократном переплаве сплава до 3-4 раз. Стронций уменьшает размеры частиц эвтектического кремния и изменяет их форму от игольчатой до компактной. Изменение морфологии эвтектического кремния уменьшает количество концентраторов напряжений и способствует повышению прочностных и пластических свойств силуминов [9].

В расплаве заэвтектических силуминов при введении скандия образуются частицы интерметаллида Al_3Sc , которые служат зародышами зерен α -твердого раствора, поскольку их кристаллическая решетка имеет высокую степень структурного соответствия с кристаллической решеткой Al. Благодаря этому скандий является эффективным модификатором. При добавлении скандия незначительное уменьшение зерна начинается уже с момента образования эвтектики. Превышение скандием эвтектического содержания, приводит к резкому измельчению зерна [10].

Сурьма создает эффект длительного модифицирования в заэвтектических силуминах. При этом повышается плотность отливок, существенно улучшается их пластичность и прочностные свойства, особенно при высоких температурах. Добавки сурьмы не приводят к газовой пористости даже при литье с низкими скоростями затвердевания. Структура и свойства отливок менее чувствительны к условиям охлаждения. Однако такие добавки могут вызвать укрупнение зерна α -твердого раствора при литье и, следовательно, снижению пластичности и прочности сплавов [1, 7].

Добавление серы уже дает значительный модифицирующий эффект,

аналогичный модифицированию фосфора, а также способствует измельчению структуры. Но стоит учитывать, что повышение содержания серы вплоть до 0,1-0,2 % не производит эффективного изменения структуры. Сера модифицирует также и эвтектику α -Si, но заметно слабее, чем при использовании флюсов с содержанием натрия [7].

Наиболее сильным модификатором высококремнистых силуминов, является фосфор. Фосфор образует с алюминием частицы фосфида алюминия AlP, которые являются центрами кристаллизации КПК [1, 7].

Наравне с фосфором широко применяют обработку расплава фосфидами. Авторами [11–13] были приведены результаты исследований модифицирования силуминов фосфидами, которые показали эффективность данного метода.

В результате обработки силумина заэвтектического состава величина кристаллов первичного кремния уменьшилась до 25-40 мкм; до модифицирования величина КПК составляла 100–120 мкм. Однако механические свойства изменились незначительно $\sigma_b = 180-200$ МПа, $\delta = 0,5-1,0$ %; HB = 95-120, что не слишком сильно отличается от исходных значений. В таблице 1 представлены результаты обработки расплава фосфидами В, Al, Ga, In.

Таблица 1 – Влияние фосфидов на механические свойства зерен первичного кремния [11]

Сплав	HB	Микротвердость КПК
Немодифицированный	106	910
BP (0,4%)	113	1600
AlP (0,4%)	106	1460
GaP (0,4%)	106	1190
InP (0,4%)	110	1170

Из представленных значений можно сделать вывод о том, что в результате модифицирования КПК фосфидами различного состава не оказало сильного эффекта. Наблюдается повышение значений микротвердости, но значение твердости повысились только после модифицирования фосфидами бора и индия.

В работах [12–15] показан модифицирующий эффект фосфористой меди на сплавы Al – (20-30 %) Si. На структуру Al-20 % Si совместно с модифицированием лигатурой Cu-P благоприятно влияет термическая обработка, заключающаяся в нагреве до 800 °С с последующей выдержкой в течение 20 минут.

Структура не модифицированных заэвтектических сплавов состоит из КПК размером до 250 мкм в алюминиевом сплаве с 20 % кремния (рисунок 1).

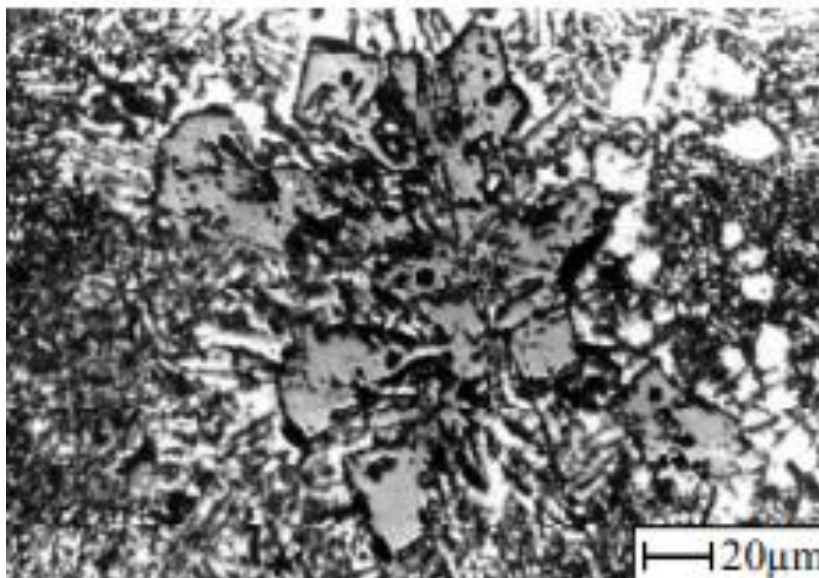


Рисунок 1 – Микроструктура сплава Al – 20 % Si

Размер КПК заметно уменьшается с увеличением количества фосфора в расплаве. Максимальный модифицирующий эффект наблюдается в количестве 0,05-0,1 масс. % фосфора. При увеличении концентрации фосфора от 0,1 до 0,4 масс. % наблюдается эффект «перемодифицирования». При модифицировании фосфидом меди размер КПК значительно уменьшается, однако влияние на эвтектику негативное. Модифицирование фосфором приводит к формированию грубо дифференцированной эвтектики, снижающей пластичность силуминов.

Одним из наиболее широко используемых модификаторов для заэвтектических силуминов является соединение Cu_3P (таблица 2).

Таблица 2 – Влияние обработки фосфористой медью (0,1 % от массы расплава) на прочность и пластичность силуминов с 20–40 %Si

Сплав	Механические свойства	
	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$\delta, \%$
Al–20 % Si	168	1,5
Al–30 % Si	75	0,7
Al–40 % Si	20	0,2

После обработки расплава фосфористой медью сплава Al–20% Si происходит диспергирование кремнистой фазы и эвтектики. Кристаллы кремния приобретают более округлую форму, но огрубляется эвтектика.

Часто применяемым видом обработки расплавов высоккремнистых силуминов является наводороживание [16-19]. При данной обработке происходит измельчение КПК и повышается содержание атомарного водорода в слитках. Первичные и эвтектические частицы кремния диспергируются и сплав приобретает эвтектическую структуру. Поэтому повышаются механические свойства и деформируемость.

Авторы [16] исследовали охлаждение изложницы и внутренней поверхности отливки из заэвтектического силумина водой. Результатом исследования стали отливки с полностью модифицированной микроструктурой без использования модификаторов. Такая структура значительно повышает антифрикционные свойства заэвтектического силумина.

Обработка расплава, увеличивающая содержание атомарного водорода, оказывает модифицирующее влияние на микроструктуру силуминов, которое зависит от содержания кремния в сплаве. Оптимально выбранный режим наводороживания позволяет измельчить структурные составляющие и улучшить их морфологию, а также уменьшить ТКЛР силуминов [17–20].

Благодаря этому в исследованиях [21, 22] была разработана серия заэвтектических легированных сплавов на основе Al – 15...20 % Si, которые были модифицированы водородом и фосфором с целью обеспечения хорошей деформируемости и высокого комплекса механических свойств при использовании следующих легирующих элементов: медь, магний, марганец, никель, хром и другие [22].

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. 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.
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. 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.
6. Попова М.В. Воздействие модифицирования на микроструктуру и физические свойства сплавов Al-(20÷40)% Si / М.В. Попова, М.А. Малюх // Актуальные проблемы в машиностроении: Сборник материалов 5-ой Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2018. – Т. 5. – № 1-2. – С. 132-138.
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. Белов В.Д. Поршневые силумины / В.Д. Белов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2005. – №1 (9). – С 32-34.
9. Белов В.Д. Влияние стронция на структуру и свойства заэвтектиче-

ского силумина / В.Д. Белов, В.В. Гусева, Л.В. Глотова, А.И. Гаврилов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 1998. – № 4. – С. 51-54.

10. Захаров В.В. Влияние скандия на структуру и свойства алюминиевых сплавов / В.В. Захаров // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2003. – № 7. – С. 7-15.

11. Нгуен К.Х. Влияние технологических параметров на эффективность процесса модифицирования лигатурой медь-фосфор заэвтектического силумина / К.Х. Нгуен, В.Д. Белов // Национальный исследовательский институт «МИСиС», Москва. – 2019. – №8. – С. 63-68.

12. Махов С. В. Комплексное модифицирование заэвтектических силуминов / С. В. Махов, Д.А. Попов // Металлургия машиностроения. – 2012. – № 4. – С. 21-23.

13. 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.

14. Пригунова А.Г. Модифицирование заэвтектических силуминов обработкой расплава импульсным электрическим током / А.Г. Пригунова, С.В. Пригунов, Д.Н. Ключник // Металлофизика и новые технологии. – 2015 – Т. 37. – № 3. – С. 367-378.

15. Стеценко В.Ю. О модифицировании заэвтектических силуминов / В.Ю. Стеценко // Литьё и металлургия. – 2008. – №1 (45). – С. 151-154.

16. Марукович Е.И. Вертикальное центробежное литье заэвтектического силумина при охлаждении литейной формы и отливки / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, К.Н. Баранов // Литьё и металлургия. – 2017. – №2 (87). – С 5-11.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. Афанасьев В.К. Водород – легирующий элемент алюминиевых сплавов / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, А.Н. Прудников, М.В. Зезиков, А.В.

Горшенин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2005. – № 6. – С. 36–39.

22. Прудников А. Н. Совершенствование термической обработки поршневых деформируемых силуминов с добавками фосфора и водорода // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2009. №1 (42). – С 8-11.

УДК 669.715.017.16

ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛОГРАФИИ И ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ МЕДИСТЫХ СИЛУМИНОВ

Полунин А.М., Попова М.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк. e-mail: alekcandr2025@mail.ru*

В статье приведены результаты металлографических и дилатометрических исследований заэвтектических силуминов с 20 и 30 % кремния, легированных медью в количестве 2, 4, 15, 20, 30, 40, 50 %. Установлено, что введение в сплавы более 20 % меди значительно изменяет морфологию структурных составляющих и их соотношение, что сказывается на величине температурного коэффициента линейного расширения.

Ключевые слова: легированные силумины, микроструктура, температурный коэффициент линейного расширения, кристаллы первичного кремния.

Одним из важнейших легирующих элементов алюминиево-кремниевых сплавов является медь. Медь необходима для повышения прочности силуминов за счет увеличения их восприимчивости к упрочняющей термической обработке [1–3]. Помимо этого, фосфористая медь является важным компонентом многих модификаторов, которые диспергируют кристаллы первичного кремния (КПК) в структуре заэвтектических сплавов Al-Si [4–9].

Промышленные алюминиевые сплавы содержат от 4,5 до 10 % Cu [10], их структура и свойства хорошо изучены, в отличие от особенностей структуры высокомедистых силуминов [11–14]. Поэтому металлографические исследования тройных сплавов с содержанием меди, многократно превышающим предел ее растворимости в алюминии, являются значимыми для расширения представлений о структурообразовании легированных силуминов. В связи в данной работе было проведено исследование металлографических особенностей и определение величины температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) медистых силуминов.

Материалами исследования являлись силумины с содержанием кремния 20 и 30% Si. Для выплавки сплавов использовали алюминий марки А7, кремний марки Кр0 и медь марки М1. Сплавы выплавляли в муфельной электропечи типа SNOL. Алюминий марки А7 расплавляли, затем добавляли