

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Администрация Правительства Кузбасса

Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»

Сибирский государственный индустриальный университет

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО
*«Металлургия – 2022»***

***Труды
XXIII Международной научно-практической конференции
23– 25 ноября 2022 г.***

Часть 1

**Новокузнецк
2022**

Редакционная коллегия

д.т.н., академик РАН Л.А. Смирнов, д.т.н., доцент А.Б. Юрьев,
д.т.н., профессор С.В. Коновалов, д.т.н., профессор Е.В. Протопопов,
д.т.н., профессор А.Р. Фастыковский, д.т.н., доцент Д.А. Чинахов,
к.т.н. Р.А. Шевченко, к.т.н., доцент О.А. Полях,
к.т.н. Е.Н. Темлянцева, д.т.н., доцент В.В. Зимин

М 540 Металлургия : технологии, инновации, качество : труды
XXIII Международной научно-практической конференции.
В 2 частях. Часть 1 / под общ. ред. А.Б. Юрьева, Сиб. гос. индустр.
ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2022. – 390 с. : ил.

Труды конференции включают доклады по актуальным вопросам теории и практики металлургических процессов, технологий обработки материалов, автоматизации, ресурсо- и энергосбережения, экологии и утилизации отходов металлургического производства.

Конференция проводится ежегодно.

ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

АДМИНИСТРАЦИЯ ПРАВИТЕЛЬСТВА КУЗБАССА
ФГБОУ ВО «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

АО «РУСАЛ-НОВОКУЗНЕЦК»

АО «КУЗНЕЦКИЕ ФЕРРОСПЛАВЫ»

АО «НЗРМК им. Н.Е. КРЮКОВА»

ЛЯОНИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ, Г. АНЫШАНЬ, КНР

ОАО «ЧЕРМЕТИНФОРМАЦИЯ»

ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН

ЖУРНАЛ «ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ»

ЖУРНАЛ «ВЕСТНИК СИБГИУ»

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР МИРОВОГО УРОВНЯ «КУЗБАСС»

АО «КУЗБАССКИЙ ТЕХНОПАРК»

ская обработка металлов. – 2017. – №7 (745). – С. 37–44.

4. Яровчук А.В. Влияние малоциклового термоциклической обработки на коррозионные и механические свойства облученной нейтронами коррозионно-стойкой стали 12X18H10T / А.В. Яровчук, О.П. Максимкин, К.В. Цай // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2017. – №7 (745). – С. 49–56.

5. Счастливцев В.М. Влияние внешних воздействий и магнитного поля на мартенситное превращение в сталях и сплавах / В.М. Счастливцев, Ю.В. Калетина, Е.А. Фокина // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2016. – № 5 (731). – С. 3–9.

6. Карпенко Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов: монография / Г.В. Карпенко. – Киев: Наукова думка, 1976. – 127 с.

7. Afanasyev V.K. Effect of melt treatment with water vapor on thermal expansion of alloy Al – 20–40% Si / Afanasyev V.K., Popova M.V., Dolgova S.V., Gorshenin A.V., Malyukh M.A. // Metallurgist. – 2019. – Т. 63. – № 1-2. – С. 87-95.

8. Афанасьев В.К. Воздействие внешней среды на формирование свойств алюминиевых сплавов при термической обработке / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, В.В. Герцен, С.В. Долгова, В.А. Лейс // Обработка металлов. – 2013. – № 4 (61). – С. 28–34.

9. Афанасьев В.К. О новом понимании микроструктуры чистого железа / В.К. Афанасьев, С.В. Долгова, М.В. Попова, С.В. Магазов, А.П. Черныш // Металлургия машиностроения. – 2017. – № 2. – С. 29–33.

10. Afanasyev V.K. Improving Strength of Structural Steels by Preheating in an Oxygen-Containing Medium / V. Afanasyev, M. Popova, I. Zhibinova // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 946. – P. 58-62.

УДК 669.715'788.017

ПРИМЕНЕНИЕ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИЛУМИНОВ

Афанасьев В.К.¹, Попова М.В.¹, Прудников А.Н.¹, Жибинова И.А.²

¹*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, m.popova@rdtc.ru*

²*Кузбасский гуманитарно-педагогический институт КемГУ,
г. Новокузнецк, Россия*

Аннотация. Установлено, что горячая пластическая деформация модифицированных заэвтектических силуминов с 15–30 % Si способствует диспергированию и сфероидизации первичных и эвтектических частиц кремнистой фазы. При этом значительно повышаются их механические свойства: временное сопротивление возрастает в 1,5 – 1,8 раза, относительное удлинение увеличивается в 2-4 раза по сравнению с литым состоянием.

Ключевые слова: силумины, обработка расплава, водород, кремний,

пластическая деформация, механические свойства.

APPLICATION OF MELT TREATMENT AND SUBSEQUENT PLASTIC DEFORMATION TO INCREASE MECHANICAL PROPERTIES OF HYPEREUTECTIC SILUMINS

Afanasyev V.K.¹, Popova M.V.¹, Prudnikov A.N.¹, Zhibinova I.A.²

¹*Siberian State Industrial University,*

Novokuznetsk, Russian Federation, m.popova@rdtc.ru

²*Kuzbass Humanitarian and Pedagogical Institute KemGu,
Novokuznetsk, Russia*

Abstract. *It has been found that hot plastic deformation of modified hypereutectic silumins with 15-30% Si promotes dispersion and spheroidization of primary and eutectic particles of the siliceous phase. At the same time, their mechanical properties are significantly increased: the ultimate resistance increases by 1.5-1.8 times, the relative elongation increases by 2-4 times compared to the cast state.*

Keywords: *silumins, melt treatment, hydrogen, silicon, plastic deformation, mechanical properties.*

Для развития современных отраслей машиностроения требуются металлические материалы, имеющие хорошие механические свойства, малый удельный вес и при этом невысокую стоимость. При разработке таких материалов особое внимание уделяется сплавам системы Al-Si заэвтектического состава. Они имеют благоприятное сочетание малого удельного веса, низкого температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) и высокой износостойкости. Однако серьезным недостатком заэвтектических сплавов Al-Si являются низкие механические свойства, которые контролируются количеством, размерами и характером распределения кристаллов первичного кремния (КПК), а также объемной долей эвтектики (α +Si) [1].

В связи с этим обязательной технологической операцией при выплавке силуминов является модифицирование, которое осуществляется путем введения в расплав различных веществ-модификаторов, влияющих на параметры процесса кристаллизации. Основной целью такой обработки расплава является диспергирование и изменение морфологии структурных составляющих, а также более равномерное распределение их по объему слитка [2]. Обзор публикаций по проблеме исследования позволяет утверждать, что значительное влияние на структуру и механические свойства сплавов системы Al-Si может оказывать водород, однако его использование для повышения свойств сплавов, содержащих более 15% Si изучено недостаточно [3-5].

Для обеспечения необходимого комплекса свойств нами ранее были разработаны многочисленные способы модифицирования сплавов системы Al-Si водородосодержащими веществами [6-10], однако не было показано, как эти способы влияют на способность к пластической деформации сплавов

алюминия с 15-30% кремния.

Целью настоящей работы являлось создание технологичного способа обработки расплава, предусматривающего увеличение содержания водорода, для модифицирования структуры в литом состоянии и повышения деформируемости сплавов Al – 15÷30% Si.

Для выплавки сплавов использовали технически чистые металлы и лигатуры. Для приготовления сплавов применяли закрытые лабораторные печи типа СШОЛ и печи шахтного типа с нагревателями из карбида кремния. В зависимости от назначения вес плавки составлял 0,5 – 5 кг. Рабочие температуры от 600 до 1400 °С. Для устранения действия побочных факторов при температурах расплава выше 750 – 800 °С использовали алундовые тигли. Для изменения структуры и свойств отливок применяли различные виды обработки расплава, в том числе проводили наводороживание расплава путем введения гидрида лития и выстаивания в атмосфере водяного пара.

Модифицирование фосфористой медью в количестве 0,1–0,2 % от массы расплава осуществляли при 1000°С. Комплексное модифицирование расплава фосфористой медью и гидридом лития в количестве 0,1 % от массы расплава проводили при температуре 850 – 900°С. Вначале вводили фосфористую медь, затем расплав обрабатывали гидридом лития. Однако введение его в расплав сопровождалось пироэффектами, а также выбросами металла, вероятность и интенсивность которых возрастают при повышении температуры расплава.

Наиболее технологично наводороживание расплава за счет выстаивания его в атмосфере водяного пара, которое осуществляли следующим образом. В закрытую печь через фарфоровую трубку на поверхность расплава каплями подавалась вода. При попадании на поверхность жидкого металла вода превращалась в пар, водяной пар разлагался по реакции $\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H} + \text{O}$, что приводило к насыщению расплава водородом. Влажность пара составляла 100 – 200 г/см³ при нормальном давлении, поэтому наводороживание расплава определялось его температурой и временем обработки. Использование предложенной методики при обычных температурах плавки (до 1000 °С) позволяет изменять содержание водорода в отливках, залитых в кокиль от 0,1 до 10 см³/100 г металла. Для исследований был выбран режим выстаивания в атмосфере водяного пара при 920 °С в течение 15 – 45 мин.

После обработки расплав выдерживали в течение 10–15 мин. и заливали в холодный алюминиевый кокиль (скорость охлаждения ~ 10–30 °С/с). Контроль температуры расплава проводили термопарами: в интервале 600 – 1100 °С хромель-алюмелевой, а в интервале 1100 – 1400 °С вольфрам-рениевой.

Пластическую деформацию изучаемых сплавов проводили путем свободнойковки и прокатки. Прокатку проводили на лабораторном одноклетье-вом двухвалковом реверсивном стане с диаметром валков 130 мм и скоростью прокатки 0,5 м/сек. Привод движения осуществляли на нижний валок с передачей вращения на верхний валок шестеренной парой. Степень обжатия ре-

гулировали нажимным устройством. Мощность двигателя стана составляла 20 кВт. Образцы нагревали до температуры 500 – 550 °С. Обжатие за проход, количество проходов и суммарное обжатие изменялось в зависимости от структуры и свойств сплавов. Исходная толщина заготовок составляла 15 – 30 мм, конечная – 1 – 3 мм. Конечная степень деформации проката составляла: 94, 91 и 89% для сплавов алюминия с 15, 20 и 30%Si соответственно.

Ковку проводили на пневматическом молоте с массой падающих частей 150 кг. Нагретые до указанных температур слитки протягивали со степенью вытяжки 4 и 16, что соответствовало деформации 75 и 94 %.

Термическая обработка сплавов, проводимая на разных этапах эксперимента, включала в себя смягчающий отжиг литых заготовок, нагрев под деформацию и промежуточный отжиг, а также отжиг деформированных образцов. Температура нагрева при отжиге и деформации сплавов была примерно одинаковой и составляла 500 – 530 °С. Нагрев образцов проводили в печах типа СНОЛ. Контроль температуры осуществляли с помощью термопары хромель-алюмель.

Микроструктуру сплавов изучали в литом состоянии и после пластической деформации. Для изучения литой структуры отрезали темплет от донной части слитков, на котором готовился шлиф. Структуру деформированных полуфабрикатов изучали на шлифах, вырезанных как вдоль, так и поперек направления деформации. Изучение микроструктуры сплавов осуществляли с помощью оптического микроскопа *OLYMPUS GX-51* при увеличениях $\times 100$ и 200 .

Содержание атомарного водорода определяли на лабораторной установке В-1 методом вакуум-нагрева в соответствии с ГОСТ 21132.1-98 «Алюминий и сплавы алюминиевые. Метод определения водорода в твердом металле вакуум-нагревом». Метод основан на экстракции водорода из анализируемого металла, нагретого ниже температуры плавления, в диапазоне 500 – 600°С, в вакууме при остаточном давлении $(6,65-9,31) \cdot 10^{-5}$ Па. Установка позволяет определять содержание водорода с точностью до 0,15 см³/100 г металла. Испытания на статическое растяжение при обычной температуре проводили на разрывной машине УММ-5 по ГОСТ 1497-84. Для испытаний использовали образцы с рабочей частью в виде цилиндра или стержня с прямоугольным сечением (плоские образцы). Из деформированных заготовок образцы вырезали вдоль направления деформации.

При исследовании влияния модифицирования на структуру и свойства сплавов, содержащих 15 – 30 % Si, было установлено, что после обработки расплава модификаторами, в состав которых входят фосфор- и водородсодержащие вещества, достигается увеличение содержания водорода в слитках и значительное измельчение кристаллов кремнистой фазы. Микроструктура сплавов Al – 20 % Si до и после обработки расплава предложенными выше модификаторами изучена при увеличении $\times 200$ и приведена на рис. 1. Металлографический анализ показал, что в микроструктуре сплава обычного приготовления присутствуют грубые кристаллы кремнистой фазы неправильной формы и тонкодисперсная эвтектика (α +Si). Из-за неравновесной

кристаллизации в структуре имеются дендриты α -твердого раствора, окаймляющие первичные кристаллы кремнистой фазы. В результате обработки расплава широко применяемым в промышленности модификатором Cu_3P размер кристаллов кремнистой фазы уменьшается до 50 – 60 мкм и они приобретают более округлую форму, однако происходит огрубление эвтектики. При комплексном модифицировании, которое заключалось в обработке смесью $\text{Cu}_3\text{P}+\text{LiH}$, формируются мелкодисперсные КПК, размер которых не превышает 20 мкм. По сравнению с широко применяемым в промышленности способом обработки расплава Cu_3P применение комплексного модифицирования смесью $\text{Cu}_3\text{P}+\text{LiH}$ весьма эффективно, т.к. содержание водорода в сплавах увеличивается примерно в два раза, при этом средний размер первичных кристаллов кремния уменьшается также примерно в два раза, при этом предельная степень пластической деформации увеличивается в 1,1 – 1,4 раза.

На рисунке 1, г представлена микроструктура сплава $\text{Al} - 20\% \text{Si}$, наводороженного путем выстаивания в атмосфере водяного пара при 920 °С в течение 45 минут. Обработка расплава этим способом позволяет увеличить количество определяемого атомарного водорода до 2,3 см³/100 г металла и получить эвтектическую тонкодисперсную структуру, характерную для сплавов $\text{Al} - 10 \div 13\% \text{Si}$.

Механические характеристики сплава $\text{Al} - 20\% \text{Si}$, выплавленного без модифицирования, модифицированного Cu_3P , смесью $\text{Cu}_3\text{P}+\text{LiH}$ и наводороженного представлены в таблице 1.

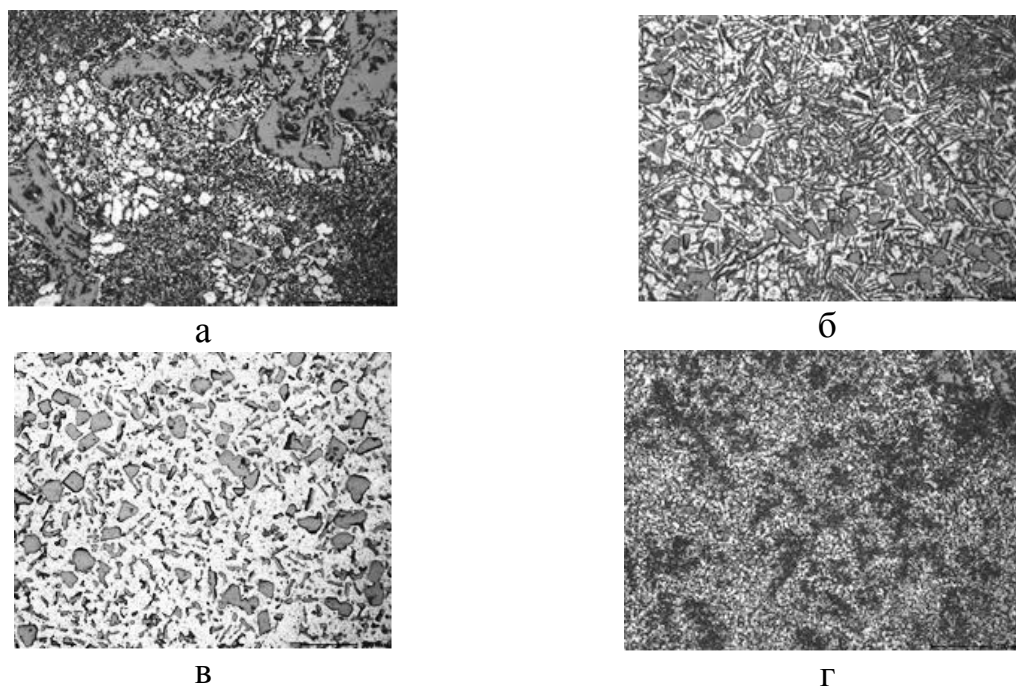


Рисунок 1 – Микроструктура сплава $\text{Al} - 20\% \text{Si}$: обычного приготовления (а), модифицированного Cu_3P (б), модифицированного $\text{Cu}_3\text{P}+\text{LiH}$ (в), наводороженного (г)

Из приведенных в таблице 1 данных следует, что временное

сопротивление сплавов после обработки в атмосфере водяного пара увеличивается в 1,4–1,5 раз по сравнению со сплавом обычного приготовления, а относительное удлинение возрастает в 2 – 2,5 раза. Столь существенное увеличение механических свойств обусловлено благоприятными структурными изменениями.

Таблица 1 – Сравнительные механические свойства сплава Al – 20 % Si после различных способов обработки расплава

Способ обработки расплава	Механические характеристики		Содержание водорода, см ³ /100 г Ме
	Временное сопротивление, σ_B , МПа	Относительное удлинение, δ , %	
Без обработки расплава	97	0,8	0,3
Модифицирование расплава 0,1 % Cu ₃ P	134	1,6	0,7
Модифицирование расплава 0,1 % смеси Cu ₃ P+LiH	147	1,5	1,5
Выстаивание расплава в атмосфере водяного пара	145	2,0	2,3

Благодаря получению модифицированной структуры для сплавов Al – 15÷30% Si, характеризующейся резким уменьшением размеров КПК и благоприятным изменением строения эвтектики от пластинчатой к глобулярной стала возможной пластическая деформация исследуемых сплавов.

После проведения пластической деформации, которую осуществляли путем свободнойковки и прокатки проводили металлографические исследования и механические испытания. Механические характеристики проката определяли также после проведения отжига (500 °С в течение 10 ч), который необходим для снятия внутренних напряжений и повышения пластичности.

Микроструктура слитков после деформации изучена при увеличении $\times 100$ и приведена на рис. 2, а механические свойства деформированных сплавов – в табл.2. Можно отметить, что горячая деформация оказывает положительное влияние на механические свойства, особенно на пластичность силуминов. Причиной такого повышения свойств является улучшение структуры при деформации, прежде всего, измельчение и сфероидизация КПК и эвтектических частиц кремнистой фазы.

Таким образом, применение разработанного способа модифицирования позволяет повысить деформируемость и механические характеристики заэвтектических сплавов системы Al–Si после горячей пластической деформации. При этом механические свойства деформированных полуфабрикатов превышают даже свойства спеченных алюминиевых сплавов. Так, прокат и поковки, полученные из силуминов с содержанием кремния 15, 20 и 30 %, имеют предел прочности в 1,5–1,8 раза выше, чем сплавы в литом состоянии.

Относительное удлинение проката и поковок из всех исследованных сплавов возрастает от 0,5÷2,2 % до 3,0÷6,6 % по сравнению с литым состоянием.

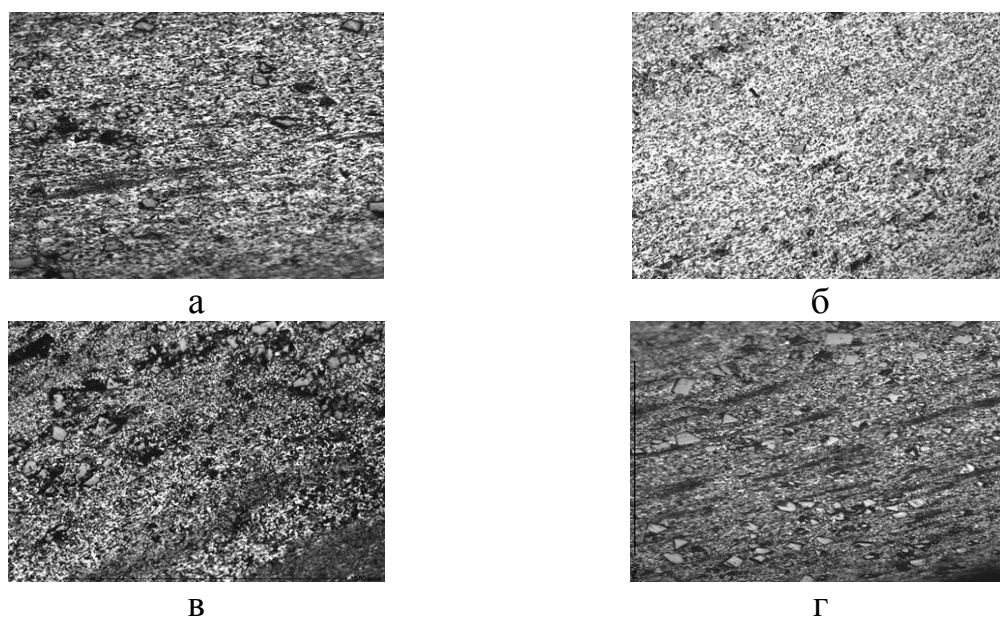


Рисунок 2 – Микроструктура деформированных заэвтектических сплавов Al-Si: сплава Al – 15 %Si без обработки расплава (а) и после модифицирования (б); сплава Al – 20 %Si без обработки расплава (в) и после модифицирования (г)

В связи с устранением микропористости, а также уменьшением общего газосодержания в деформированном металле удельный вес деформированных заэвтектических силуминов немного увеличивается. Так, удельный вес сплава Al – 15 % Si возрастает от 2622,4 до 2634,0 кг/м³, а удельный вес сплава Al – 20 % Si увеличивается от 2602,0 до 2614,5 кг/м³.

Таблица 2 – Механические характеристики сплавов Al-Si после различной обработки

Технология обработки	Механические свойства сплавов					
	Al – 15 %Si		Al – 20 %Si		Al – 30 %Si	
	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	δ , %
Литой	166	2,2	145	2,0	120	0,5
Прокат	186	0,7	198	0,2	130	0,1
Прокат и отжиг	216	8,2	217	5,6	161	2,3
Ковка	256	6,6	238	5,2	215	3,0

Выводы

1. Обработка расплава, увеличивающая содержание диффузионно-подвижного водорода в заэвтектических сплавах Al-Si, способствует диспергированию первичных и эвтектических кристаллов кремнистой фазы и даже получению в заэвтектическом сплаве структуры эвтектики без КПК,

вследствие чего значительно повышаются механические свойства высококремнистых сплавов и их деформируемость.

2. Установлено, что горячая пластическая деформация модифицированных заэвтектических сплавов Al–Si способствует улучшению параметров их структуры, прежде всего, дополнительному измельчению и сфероидизации КПК и эвтектических частиц кремнистой фазы. При этом значительно повышаются их механические свойства: временное сопротивление возрастает в 1,5 – 1,8 раза, а относительное удлинение увеличивается в 2 – 4 раза по сравнению с литым состоянием.

Библиографический список

1. Строганов Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием / Г.Б. Строганов, В.А. Ротенберг, Г.Б. Гершман. – Москва: Металлургия, 1977. – 272 с.
2. Напалков В.И. Модифицирование алюминиевых сплавов / В.И. Напалков, С. В. Махов., А. В. Поздняков. – Москва: МИСИС, 2017. – 347 с.
3. Борисов Г.П. О роли водорода в формировании структуры и свойств алюминиевых сплавов / Г.П. Борисов // Металлургия машиностроения. – 2005. – № 5. – С. 11–20.
4. Колачев Б.А. Водород в металлах и сплавах / Б.А. Колачев // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1999. – №3. – С. 3 – 11.
5. P.D. Hess and G.K. Tumbull. Effects of Hydrogen on Properties of Aluminum Alloys // Paper from Hydrogen in Metals, American Society for Metals. – 1974. – P. 277–287.
6. Афанасьев В.К. Водород – легирующий элемент алюминиевых сплавов / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, А.Н. Прудников, М.В. Зезиков, А.В. Горшенин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 6. – С. 36–39.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.

ВЛИЯНИЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОМПОЗИТА Ti/TiB, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ <i>Озеров М.С., Поволяева Е.А., Громишова Д.В., Волокитина Е.И.</i>	298
ТЕРМИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПРЕССОВОК ИЗ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА <i>Прудников А.Н., Прудников В.А., Рексис В.С.</i>	303
ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА В КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ <i>Афанасьев В.К., Попова М.В., Жибинова И.А.</i>	310
ПРИМЕНЕНИЕ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИЛУМИНОВ <i>Афанасьев В.К., Попова М.В., Прудников А.Н., Жибинова И.А.</i>	315
ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ МАРКИ К76Ф НА УДАРНУЮ СТОЙКОСТЬ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ <i>Уманский А.А., Симачев А.С., Думова Л.В., Сафонов С.О.</i>	323
ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА С ДОБАВКАМИ ДИОКСИДА ТИТАНА <i>Хамид. Махан М., Коновалов С.В., Куценко А.А., Цветков А.В., Панченко И.А.</i>	327
ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ СТАЛЕЙ В ПРОЦЕССАХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ <i>Васильев А.А., Колбасников Н.Г.</i>	332
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОКАТКИ РЕЛЬСЫ В НЕПРЕРЫВНОЙ ГРУППЕ КЛЕТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ QFORM <i>Белопицкая Е.С., Соловьев В.Н.</i>	341
УПРАВЛЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРУКТУРОЙ ТРУБНЫХ МАРК СТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ <i>Колбасников Н.Г., Жуков Н.В.</i>	348
ПРИЧИНЫ И МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ТИПА «МОРЩИНА» ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ СОРТОВОЙ СТАЛИ <i>Колбасников Н.Г., Адигамов Р.Р., Шишов И.А., Зайцев А.М.</i>	356
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МНОГООУПЕЧЕННОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СПЛАВЫ СЕРИИ AL-MG-SI С ИЗБЫТКОМ КРЕМНИЯ И НЕБОЛЬШИМИ ДОБАВКАМИ СКАНДИЯ И ЦИРКОНИЯ <i>Арышенский Е.В., Лапинов М.А., Солопаев М.В., Коновалов С.В.</i>	367
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ РЕЛЬСОВ <i>Сарычев В.Д., Филяков А.Д., Чумаков И.И., Коновалов С.В.</i>	374
ВЛИЯНИЕ МЕДИ НА СТРУКТУРУ И ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ СПЛАВОВ AL – 40%Si <i>Афанасьев В. К., Попова М.В., Малюх М.А.</i>	379