

Научный журнал

ВЕСТНИК

Сибирского
государственного
индустриального
университета

№ 3 (21), 2017

Основан в 2012 году
Выходит 4 раза в год

Учредитель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Редакционная коллегия

М.В. Темлянец
(главный редактор)
С.В. Коновалов
(отв. секретарь)
П.П. Баранов
Е.П. Волынкина
Г.В. Галевский
В.Ф. Горюшкин
В.Е. Громов
Л.Т. Дворников
Жан-Мари Дрезет
Стефан Золотарефф
Пенг Као
С.М. Кулаков
А.Г. Никитин
Е.Г. Оршанская
Т.В. Петрова
Е.В. Протопопов
В.И. Пантелеев
Арвинд Сингх
А.Ю. Столбоушкин
И.А. Султангузин
А.В. Феоктистов
В.Н. Фрянов
В.П. Цымбал
Си Чжан Чен

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Guoyi Tang, Xiaohui Li, Guolin Song, Gromov V.E. Recent progress of external field processing technology in China.....4
Прудников А.Н., Попова М.В., Прудников В.А. Воздействие деформации на структуру и свойства силуминов.....11
Попова М.В., Прудников А.Н., Долгова С.В., Малюх М.А. Перспективные алюминиевые сплавы для авиационной и космической техники.....18
Уманский А.А., Козырев Н.А., Думова Л.В. Анализ взаимосвязи состава металлошихты электроплавки с основными технико-экономическими показателями выплавки рельсовой стали.....24

ГОРНОЕ ДЕЛО И ГЕОТЕХНОЛОГИИ

- Домрачев А.Н., Риб С.В. Обоснование алгоритма оценки влияния состояния выемочных выработок при моделировании работы длинного очистного забоя.....29

ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Ганиев И.Н., Ниёзов Х.Х., Гулов Б.Н., Низомов З., Бердиев А.Э. Температурная зависимость теплоемкости и термодинамических функций сплава АК1М2, легированного празеодимом и неодимом.....32
Ганиев И.Н., Джайлоев Дж.Х., Амонов И.Т., Эсанов Н.Р. Влияние щелочноземельных металлов на анодное поведение сплава Al + 2,18 % Fe в нейтральной среде.....40

АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

- Благиных Е.А., Стерлигов В.В. Обоснование пространственного развития поселения Теба Междуреченского городского округа кемеровской области.....45

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

- Шмыглева А.В. Заповедники раннесоветской эпохи: теория и практика.....51
Панова В.Ф., Панов С.А., Карпачева А.А., Прохоренко О.Д. Переработка отходов обогащения железной руды.....56

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Думова Л.В., Уманский А.А. Проблема идентификации заинтересованных сторон российскими компаниями в рамках функционирования концепции устойчивого развития (на примере металлургической отрасли).....63

УДК 621.777:669.715

*А.Н. Прудников, М.В. Попова, В.А. Прудников***Сибирский государственный индустриальный университет****ВОЗДЕЙСТВИЕ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СИЛУМИНОВ***

В настоящее время некоторые металлические материалы не могут быть использованы в промышленности для получения изделий путем обработки давлением из-за их низкой пластичности или полного ее отсутствия. К таким материалам можно отнести заэвтектические силумины. Первые работы по деформации таких силуминов появились сравнительно недавно – в конце XX века, хотя еще в 1930-ые годы С.М. Воронин установил возможность обработки давлением сплавов, содержащих до 20 % гитвубз [1]. В последние несколько десятилетий появились работы, посвященные различного вида пластической деформации высококремнистых силуминов. Так, в работах [2 – 6] показана связь химического состава заэвтектических силуминов с ресурсом пластичности и с энергосиловыми и термоскоростными параметрами процессов горячего прессования и прокатки, осуществляемых различными способами. В работах, посвященных технологиям изготовления заготовок и поршней двигателей обработкой давлением из легированных заэвтектических силуминов [7 – 12], результаты получены в промышленных условиях. Однако работ, выполненных по этой тематике в области заэвтектических силуминов, недостаточно. Кроме того, необходимо учитывать присутствие в алюминиевых сплавах водорода (объем которого составляет 60 – 90 % от общего объема газов), который способен взаимодействовать с металлом в процессе его деформирования [13]. Сведения, приводимые в литературе, в основном носят отрывочный характер и, в подавляющем большинстве, не учитывают связь содержания водорода со структурой и механическими свойствами при деформации силуминов.

В настоящей работе проведено исследование влияния деформации на микроструктуру,

содержание водорода и механические свойства силуминов, содержащих 11 – 30 % кремния.

В работе исследовали бинарные эвтектические и заэвтектические силумины, содержащие 11, 15, 20, 25 и 30 % кремния. Сплавы готовили в электрической печи сопротивления с карбидокремниевыми нагревателями из технической чистого алюминия А6 и кремния Кр0. Силумины, содержащие 15 – 30 % кремния, модифицировали фосфористой медью МФ-1 (содержание фосфора составляло примерно 10 %) в количестве 0,1 % от массы расплава. Содержание фосфора в сплавах составляло 0,008 – 0,0011 % по показаниям эмиссионного спектрометра ARL 4460. При выплавке силумина эвтектического состава модифицирование не проводили. Заливку проводили в алюминиевую форму квадратного сечения с размером стороны 80 мм и высотой 250 мм. Для получения заготовок под деформацию от слитка отрезали донную (высотой 15 мм) и прибыльную (высотой 50 мм) части. Масса заготовки составляла 3,20 – 0,05 кг. Заготовки перед деформацией подвергали гомогенизирующему отжигу при температуре 500 ± 10 °С в течение 2 ч. Температура нагрева заготовок под ковку, которую проводили на пневматическом молоте МВ 412 с массой падающих частей 150 кг, составляла 510 – 550 °С в зависимости от содержания кремния в силумине. Заготовки из сплавов, содержащих 11 – 15 % кремния, благодаря достаточной пластичности были прокованы на пруток сечением 15×15 мм без промежуточных отжигов. Температура окончанияковки составляла 350 – 400 °С. Для сплавов, содержащих 20 – 30 % кремния, в процессековки проводили промежуточные отжиги при температуре 510 – 550 °С в течение 1,0 – 1,5 часа. Сечение прутка 15×15 мм было получено после 3 – 5 цикловковки. Величина общего коэффициента уюва ($K_{\text{общ}}$) для прутков из всех исследуемых сплавов составляла 28. Постдеформационный отпуск поковок проводили при температуре 520 ± 10 °С в течение 2 ч.

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

Для исследования микроструктуры сплавов и определения объемных долей структурных составляющих использовали оптический анализатор «EPIQANT» (Karl Zeiss).

Механические характеристики определяли по испытаниям на статическое растяжение в соответствии с ГОСТ 1497 – 84 на цилиндрических образцах с диаметром рабочей части 6 мм на машине «Instron – 3369». Для измерения микротвердости α -твердого раствора алюминия в силуминах использовали прибор ПМТ-5.

Рентгеноструктурный анализ проводили с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3,0 в кобальтовом K_{α} -излучении с длиной волны (λ) 0,1790 нм. Для расчета параметра решетки α -твердого раствора алюминия использовали линию $(331)_{\alpha}$ с поправками на преломление и поглощение.

Содержание водорода определяли методом вакуумной экстракции на газоанализаторе В-1 с использованием образцов диам. 8 мм и длиной 45 мм.

Известно, что в алюминиевых сплавах со структурой твердого раствора после горячей пластической деформации – содержание водорода уменьшается, а после холодной деформации – увеличивается [14, 15]. Деформация алюминий-кремниевых сплавов приводит к изменению содержания водорода не только в твердом растворе, но и в выделениях эвтектического и первичного кремния.

На рис. 1 показано влияние содержания кремния и состояния сплава на содержание водорода, определенное в сплавах Al – 11 ÷ 30 % Si. В литом состоянии в силуминах большая часть водорода методом вакуумной экстракции не определяется, так как он находится в связанном виде в выделениях фазы β -Si и на межфазных границах [16]. Резкое увеличение экстрагированного количества водорода в горячедеформированном сплаве, видимо, связано с его перераспределением из выделений фазы β -Si в твердый раствор. После холодной деформации содержание водорода в сплавах увеличивается еще значительно – до 10 – 30 $\text{см}^3/100$ г металла, а отжиг деформированной заготовки существенно снижает газосодержание. Объяснить полученные результаты можно, если учесть тот факт, что при деформации силумина под действием повышенных температур и напряжений, возникающих в металле, водород переходит из выделений фазы β -Si и с межфазных границ в матричный твердый раствор алюминия. Этот процесс вызывает резкое увеличение содержания экстрагированного водорода в деформированном силумине. В то же время при горячей

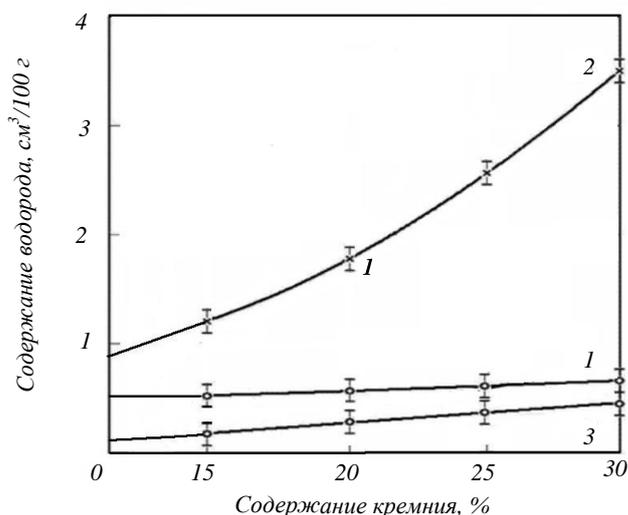


Рис. 1. Влияние содержания кремния и состояния сплава на количество экстрагированного водорода из силуминов: 1 – литое состояние; 2 – состояние после отжига при 500 °С в течение 2 ч и горячейковки; 3 – состояние после постдеформационного отжига при 520 °С в течение 2 ч

деформации протекает процесс дегазации, то есть выхода водорода из твердого раствора алюминия в атмосферу. По-видимому, соотношение интенсивностей протекания этих процессов и определяет содержание водорода в заготовке после его деформации. Можно полагать, что именно поэтому резко возрастает содержание водорода в заэвтектических силуминах при холодной деформации: содержание водорода повышается в твердом растворе весьма интенсивно, а его дегазация практически не протекает при комнатной температуре.

С повышением содержания кремния в силуминах в их структуре увеличивается объемная доля кристаллов первичного и эвтектического кремния и, следовательно, возрастает количество водорода, связанного в них. Такое положение при деформации литых сплавов приводит к более интенсивному росту содержания экстрагированного водорода в деформированных заготовках, имеющих в своем составе большее количество кремния. Для высококремнистых силуминов с содержанием кремния более 25 % уже при незначительных степенях деформации при ковке и прокатке содержание водорода в твердом растворе резко возрастает (до 3 – 4 $\text{см}^3/100$ г и выше) и только с помощью длительного отжига можно снизить его содержание.

Указанные изменения содержания водорода при деформации силуминов в наибольшей мере справедливы для заэвтектических сплавов, в структуре которых содержится значительное количество кристаллов первичного кремния (КПК). Если же с помощью наводороживания

расплава и увеличения скорости кристаллизации в слитках из заэвтектических сплавов подавлено образование первичных кристаллов [17 – 19], то увеличение содержания водорода при последующей деформации происходит в меньшей мере. Например, при деформации сплава Al – 20 % Si с эвтектической структурой выделение количества экстрагированного водорода намного меньше ($0,8 \text{ см}^3/100 \text{ г}$), чем в сплаве того же состава, модифицированном фосфористой медью ($1,8 \text{ см}^3/100 \text{ г}$).

Горячая деформация совместно с отжигом значительно уменьшает содержание водорода в силуминах и приводит к существенным изменениям их структуры. Причем наибольшие изменения микроструктуры фиксируются в зонах с максимальной степенью деформации. Так как при прокатке максимальные напряжения и деформации сосредоточены в поверхностных слоях заготовок, то именно здесь в наибольшей мере измельчаются КПК и протекает процесс дегазации при отжиге, который приводит к уменьшению травимости выделений первичного кремния и твердого раствора. Послековки заготовок максимальные структурные изменения происходят в центральной части, а при прессовании их расположение определяется схемой истечения металла.

Микроструктура силуминов, содержащих 11 и 20 % кремния, в литом состоянии и после горячейковки с общим коэффициентом укова 28 приведена на рис. 2. Можно констатировать, что деформация с отжигами приводит к измельчению КПК, сфероидизации выделений эвтектического кремния и значительному увеличению количества α -твердого раствора. С увеличением суммарной степени деформации усиливается строчное расположение как первичных, так и эвтектических выделений кремния в структуре поковок. Причем в их центральной зоне формируется структура с минимальным количеством КПК и более мелкой глобулированной эвтектикой, чем в остальных зонах, что объясняется возникновением максимальных деформаций в этой зоне при ковке. С увеличением продолжительности и числа промежуточных отжигов различия по структуре между зонами поковки для заэвтектических силуминов уменьшаются. Результаты количественного анализа микроструктуры сплава Al – 20 % Si в зависимости от степени горячей деформации (рис. 3) соответствуют литературным данным [20 – 22] об измельчении КПК, а также показывают значительное

увеличение объемной доли α -твердого раствора. Такое изменение соотношения структурных составляющих сплава находится в соответствии с процессами дегазации, протекающими при горячей ковке и отжиге силуминов. В то же время в результате холодной деформации повышается содержание водорода в сплавах и увеличивается объемная доля эвтектики.

Так, в структуре слитка из сплава Al – 11 % Si объемные доли твердого раствора и эвтектики составляли 34,8 и 65,2 % соответственно. После горячейковки в микроструктуре определили уже 46,6 % α -твердого раствора и 53,4 % эвтектики, а микроструктура этого же сплава после холодной деформации состояла из 28,4 % твердого раствора и 71,6 % эвтектики. Отжиг деформированного металла приводит к увеличению объемной доли твердого раствора до 66,6 % при уменьшении доли эвтектики до 33,4 % (рис. 4). Для сплава, содержащего 20 % кремния, объемная доля твердого раствора увеличивается от 9 % в литом состоянии до 43,6 % в сплаве, подвергнутом горячей циклической деформации с последующим отжигом.

Указанные изменения микроструктуры, происходящие при горячей деформации и отжиге силуминов, определяются величиной степени деформации и позволяют говорить о растворении части кремния в α -твердом растворе алюминия. Рентгеноструктурный анализ образцов, вырезанных из силуминовых поковок, показал, что после горячей пластической деформации происходит некоторое уменьшение параметра решетки α -твердого раствора алюминия (см. таблицу). Такое уменьшение параметра решетки α -твердого раствора в заэвтектических силуминах можно объяснить одновременным протеканием нескольких процессов при горячей деформации. Прежде всего происходит растворение части кремния в алюминиевой матрице, при этом уменьшается параметр ее кристаллической решетки. Это уменьшение связано с тем, что кремний образует в алюминии твердый раствор замещения, а радиус его атома меньше, чем у атома основы [23]. Наряду с этим при разложении кристаллов кремния под действием температуры и напряжений, возникающих при деформации, происходит выделение водорода, растворенного в них и находящегося на межфазных границах, в твердый раствор и последующий его выход из решетки алюминия в атмосферу.

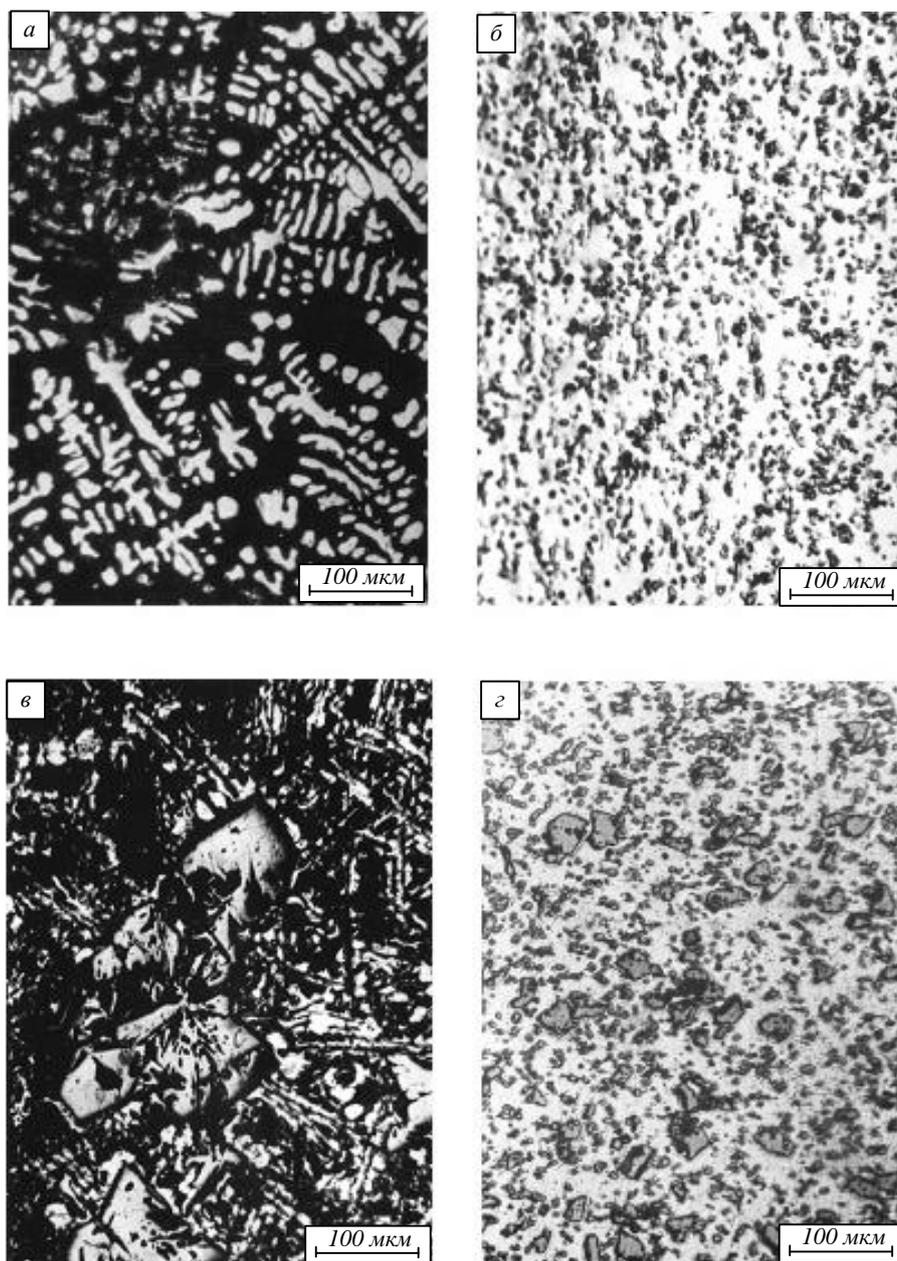


Рис. 2. Микроструктура силуминов с 11 % Si (а, б) и 20 % Si (в, г) в литом состоянии (а, в) и после гомогенизирующего отжига при 500 °С в течение 2 ч последующей горячейковки ($K_{общ} = 28$) и отжига при 520 °С в течение 2 ч (б, г) $\times 120$

Если переход водорода в α -твердый раствор алюминия увеличивает параметр решетки последнего, то удаление его в атмосферу оказывает противоположное действие. Данные по микротвердости α -твердого раствора алюминия для силуминов с содержанием кремния 11 – 25 % подтвердили возможность его упрочнения за счет растворения в нем части кремния в процессе деформации сплавов. Для заэвтектических силуминов упрочнение твердого раствора после деформации составило 8 – 17 %, а для эвтектического состава – 6 % (см. таблицу). Результаты определения механических характеристик при растяжении образцов, изготовлен-

ных из литых и горячедеформированных силуминов после отжига, приведены на рис. 5. Можно констатировать, что горячая деформация совместно с отжигами положительно влияет на механические свойства силуминов, особенно на пластичность, что, в первую очередь, связано с измельчением и сфероидизацией первичных и эвтектических выделений β -Si. Так, поковки, полученные из силуминов с содержанием кремния 20 – 30 % ($K_{общ} = 28$), имеют временное сопротивление разрыву на 15 – 75 % выше, чем сплавы в литом состоянии. Отсутствие прироста прочности для поковок, содержащих 11 и 15 % кремния, можно

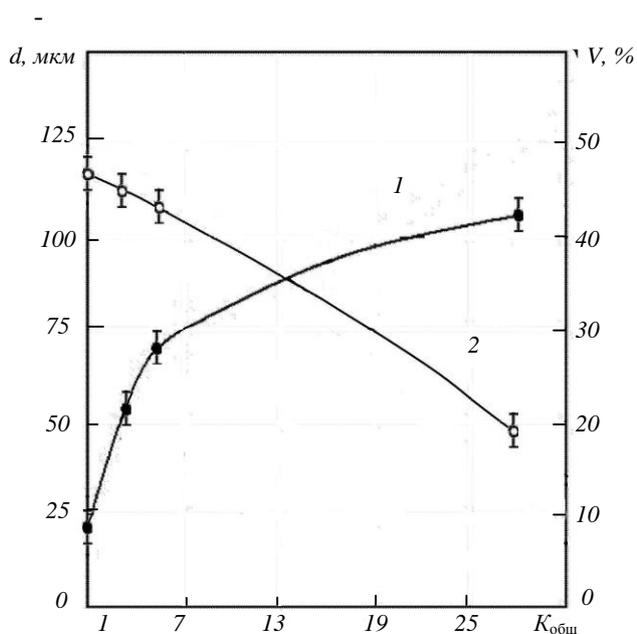


Рис. 3. Изменение объемной доли α -твердого раствора V (1) и среднего размера КПК d (2) в зависимости от общего коэффициента уюва ($K_{обш} = 28$) для сплава Al – 20 % Si

объяснить влиянием динамической рекристаллизации, протекающей при температуре горячей деформации и снижающей эффект наклепа и измельчения КПК, тем более, что в структуре эвтектического силумина они отсутствуют (Al – 11 % кремния), а в сплаве с 15 % кремния

Влияние горячей пластической деформации ($K_{обш} = 28$) на микротвердость (H_{μ}) и параметр решетки α -твердого раствора алюминия (a) в силуминах

Сплав*	H_{μ} , МПа	a , нм
Al – 11 % Si	520	0,40580
	551	0,40556
Al – 15 % Si	548	0,40573
	644	0,40556
Al – 20 % Si	558	0,40550
	630	0,40525
Al – 25 % Si	499	0,40515
	542	0,40488

*Приведены значения параметров в литом состоянии (числитель) и после отжига иковки (знаменатель)

Так, в несколько раз увеличивается относительное удлинение, достигая для эвтектического силумина значений, превышающих 16 %, а для поковок из заэвтектических силуминов – 5 – 14 %. Такой характер изменения механических свойств силуминов при их деформации согласуется с результатами работ [3, 20].

Выводы. Горячая деформация высококремнистых силуминов приводит к измельчению и сфероидизации первичных и эвтектических

их доля незначительна. Наиболее существенно после отжигов и горячейковки повышается пластичность силуминов.

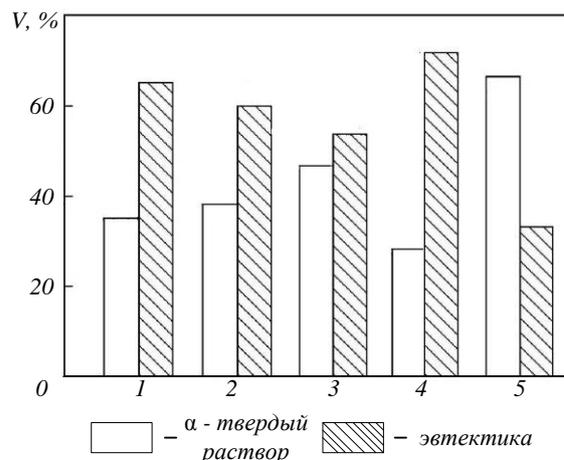


Рис. 4. Зависимость объемных долей (V) α -твердого раствора и эвтектики (Al + Si) в сплаве Al – 11% Si от его состояния:

1 – литое; 2 – после отжига при 500 °C в течение 2 ч; 3 – после отжига при 500 °C в течение 2 ч и горячейковки; 4 – после отжига при 500 °C в течение 2 ч и холоднойковки; 5 – после постдеформационного отжига при 520 °C в течение 2 ч

кристаллов β -Si, а также к увеличению в структуре объемной доли α -твердого раствора. Указанные изменения структуры эвтектических и заэвтектических силуминов обеспечивают значительное повышение их механических характеристик, особенно пластических, что открывает широкие перспективы использования этих сплавов в деформированном состоянии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воронов С.М., Саморуков И.А. Исследование сплавов типа силумин. – М.: Металлургиздат, 1933. – 100 с.
2. Эскин Г.И., Артес А.Е., Панов Е.И. и др. Исследование технологии изготовления деформированных полуфабрикатов из заэвтектических силумина 01392 с использованием поперечно-винтовой прокатки // Технология легких сплавов. 2008. № 1. С. 83 – 89.
3. Панов Е.И., Эскин Г.И. Влияние поперечно-винтовой прокатки на структуру и свойства заэвтектических силуминов // МиТОМ. 2004. № 9. С. 7 – 13.
4. Прудников А.Н. Поршневые деформируемые заэвтектические силумины // Технология металлов. 2014. № 2. С. 8 – 11.
5. Афанасьев В.К., Прудников А.Н., Перетячко В.Н. Оценка пластичности и сопротивления деформации заэвтектического поршневого силумина // Изв. вуз. Цветная металлургия. 2003. № 2. С. 23 – 25.
6. Афанасьев В.К., Прудников А.Н. Разработка состава поршневого заэвтектического силумина // Изв. вуз. Черная металлургия. 1998. № 4. С. 35 – 37.
7. Эскин Г.И., Пименов Ю.П. Получение деформированных полуфабрикатов из заэвтектических силуминов // Технология легких сплавов. 1996. № 2. С. 51 – 55.
8. Прудников А.Н. Технология производства, структура и свойства поршней двигателей из заэвтектического деформируемого силумина // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 5. С. 45 – 48.
9. Афанасьев К.В., Прудников А.Н., Горшенин А.В. Технология получения слитков, деформированных заготовок и поршней из заэвтектического жаропрочного силумина и их свойства // Обработка металлов. 2010. № 3. С. 28 – 31.

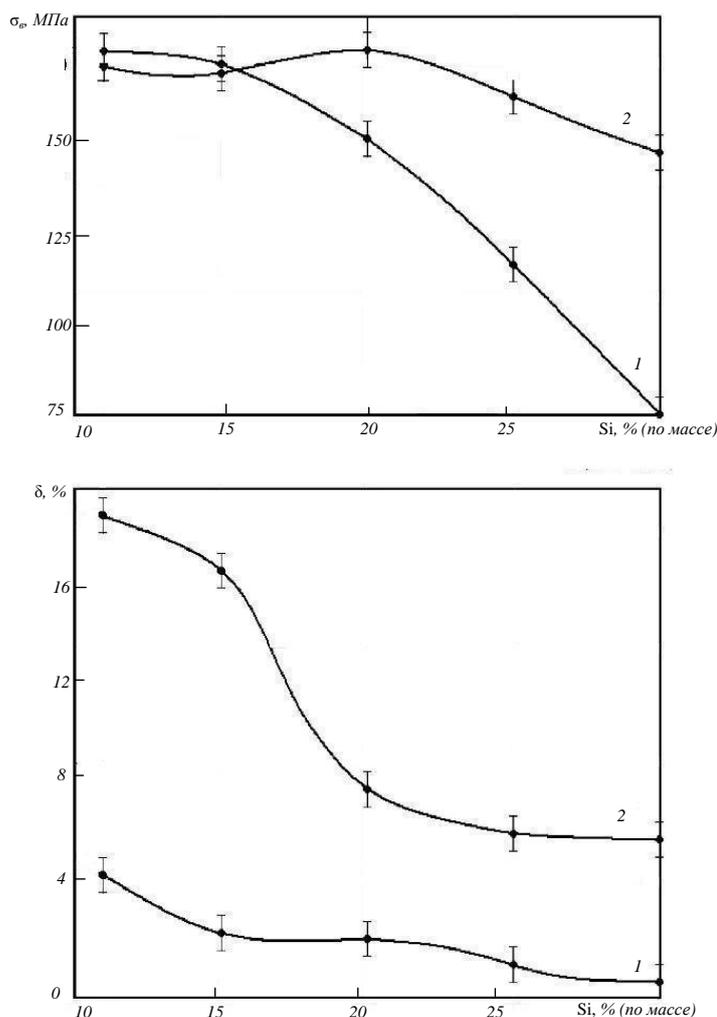


Рис. 5. Зависимость временного сопротивления разрыву ($\sigma_{в}$) и относительного удлинения (δ) образцов из силуминов в литом состоянии (1) и после отжига при 500 °С в течение 2 ч и горячейковки ($K_{общ} = 28$) (2)

10. Прудников А.Н., Прудников В.А. Формирование структуры заэвтектического силумина при литье слитков полунепрерывным способом // Актуальные проблемы в машиностроении. 2017. Т. 4. № 3. С. 78 – 83.
11. Prudnikov A.N. Deformable heatproof transeutectic sillumin for pistons // Steel in Translation. 2009. Vol. 39. No. 6. P. 456 – 459.
12. Прудников А.Н., Прудников В.А. Использование термоциклической деформации для получения полуфабрикатов из заэвтектических силуминов. – В кн.: *Металлургия: технологии, инновации, качество. Сб. материалов XIX Международной научно-практич. конф.* – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2015. С. 15 – 18.
13. Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах. / В.И. Добаткин, Р.М. Габидуллин, Б.А. Колачев и др. – М.: *Металлургия*, 1976. – 264 с.
14. Гельд П.В., Рябов Р.А. Водород в металлах и сплавах. – М.: *Металлургия*, 1974. – 272 с.
15. Колачев Б.А. Водород в металлах и сплавах // *МиТОМ*. 1999. № 3. С. 3 – 11.
16. Чернега Д.Ф. Массоперенос водорода в алюминии и сплавах на его основе. – В кн.: *Водородная экономика и водородная обработка материалов. Сб. трудов V межд. конф. Донецк, Украина 21-25 мая .2007.* – Донецк: ДонНГУ, 2007. Т. 2. С. 651 – 654.
17. Прудников А.Н. Роль условий кристаллизации в формировании структуры и свойств слитков и поковок из заэвтектических силуминов // *Материаловедение*. 2014. № 1. С. 10 – 13.
18. Прудников А.Н. Структурно-технологические основы разработки прецизионных силуминов с регламентированным содержанием водорода: Автореф. дис...д-ра техн. наук: 05.16.09. Новосибирск, 2013. – 40 с.
19. Prudnikov A.N. Formation of eutectic structure in Al-20 % Si alloy during crystallization // *Металлургия машиностроения*. 2009. № 4. С. 10 – 13.
20. Елисеев А.Н., Щерба В.Н., Эскин Г.И и др. Особенности горячего прессования заэвтектических силуминов // *Изв. вуз. Цветная металлургия*. 1996. № 4. С. 25 – 29.
21. Прудников А.Н. Комплексное воздействие отжига и термоциклическойковки на структуру и свойства заэвтектических силуминов // *Деформация и разрушение материалов*. 2014. № 2. С. 14 – 20.
22. Прудников А.Н., Бочкарева Ю.В. Формирование структуры поршневого алюминиево-кремниевого сплава в процессе получения заготовок. – В кн.: *Физика твердого тела. Сб. материалов VI Российской научн. конф.* – Томск: изд. ТГУ, 1998. 39 с.
23. Шаскольская М.П. *Кристаллография*. – М.: Высшая школа, 1976. – 391 с.

© 2017 г. А.Н. Прудников,
М.В. Попова, В.А. Прудников
Поступила 25 августа 2017 г.