

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 % Si [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 укова ($K_{\text{общ.}}$) 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 алюминиево-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 $\text{см}^3/100 \text{ г}$ 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

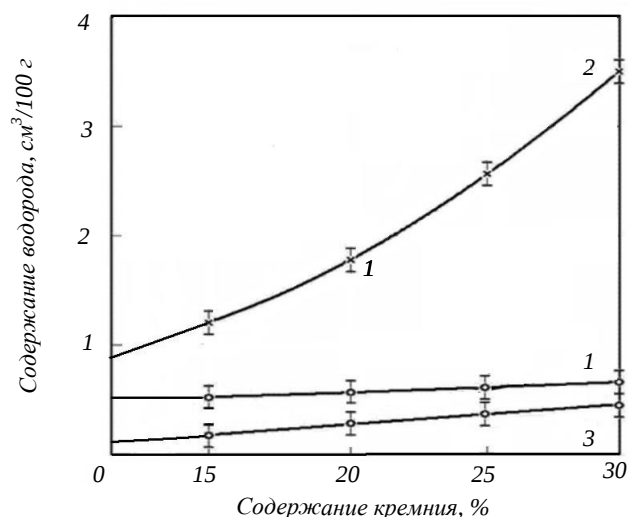


Рис. 1. Влияние содержания кремния и состояния сплава на количество экстрагированного водорода из силуминов: 1 – литое состояние; 2 – состояние после отжига при 500 °C в течение 2 ч и горячейковки; 3 – состояние после постдеформационного отжига при 520 °C в течение 2 ч

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 $\text{см}^3/100 \text{ г}$ 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 строчечное 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.

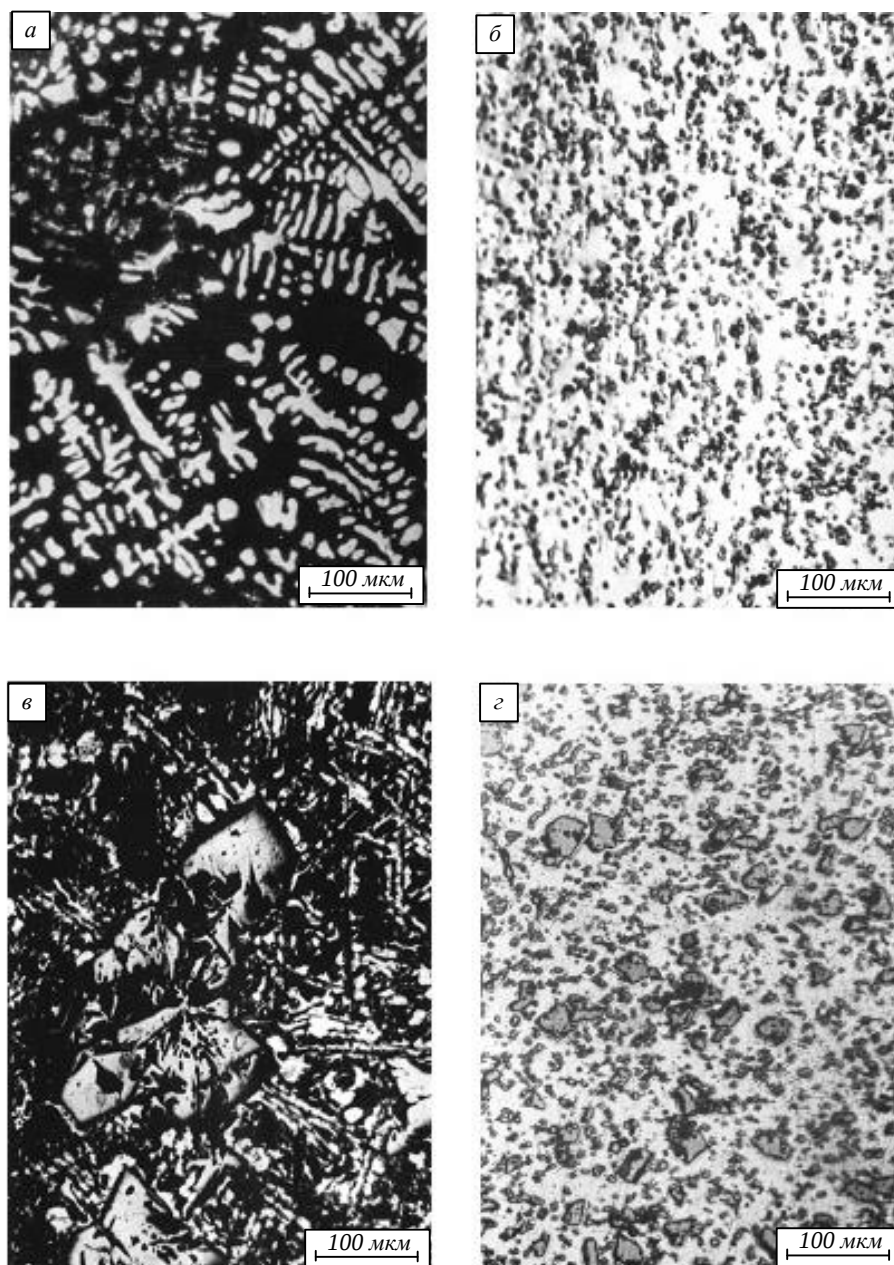


Рис. 2. Микроструктура силуминов с 11 % Si (а, б) и 20 % Si (в, г) в литом состоянии (а, в) и после гомогенизирующего отжига при 500 °С в течение 2 ч последующей горячейковки ($K_{\text{общ}} = 28$) и отжига при 520 °С в течение 2 ч (б, г) $\times 120$

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 % ($K_{\text{общ}} = 28$), имеют временное сопротивление разрыву на 15 – 75 % выше, чем сплавы в литом состоянии. Отсутствие прироста прочности для поковок, содержащих 11 и 15 % кремния, можно

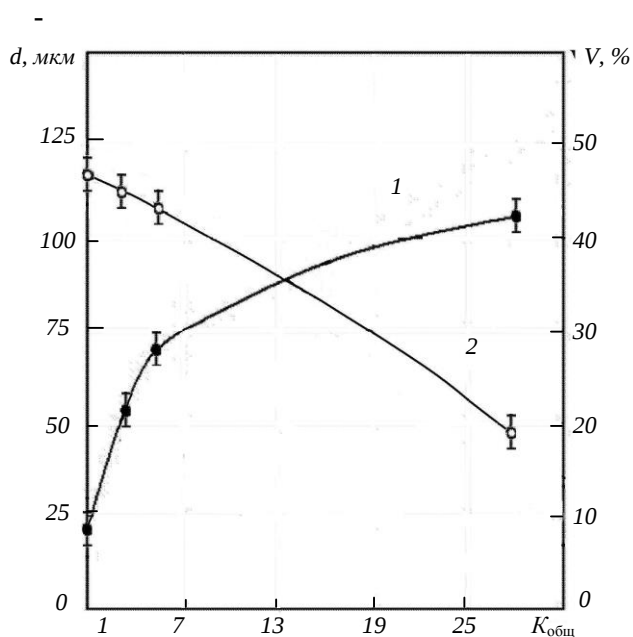


Рис. 3. Изменение объемной доли α -твердого раствора V (1) и среднего размера КПК d (2) в зависимости от общего коэффициента укова ($K_{общ} = 28$) для сплава Al – 20 % Si

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 ($K_{общ} = 28$) на микротвердость (H_R) и параметр решетки α -твердого раствора алюминия (a) в силуминах

Сплав*	$H_R, \text{МПа}$	$a, \text{нм}$
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.

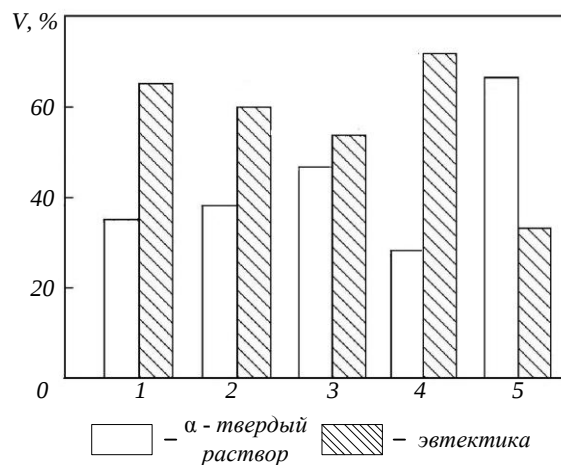


Рис. 4. Зависимость объемных долей (V) α -твердого раствора и эвтектики (Al + Si) в сплаве Al – 11% Si от его состояния:

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 В.К., Прудников А.Н., Горшенев А.В. Технология получения слитков, деформированных заготовок и поршней из заэвтектического жаропрочного силумина и их свойства // Обработка металлов. 2010. № 3. С. 28 – 31.

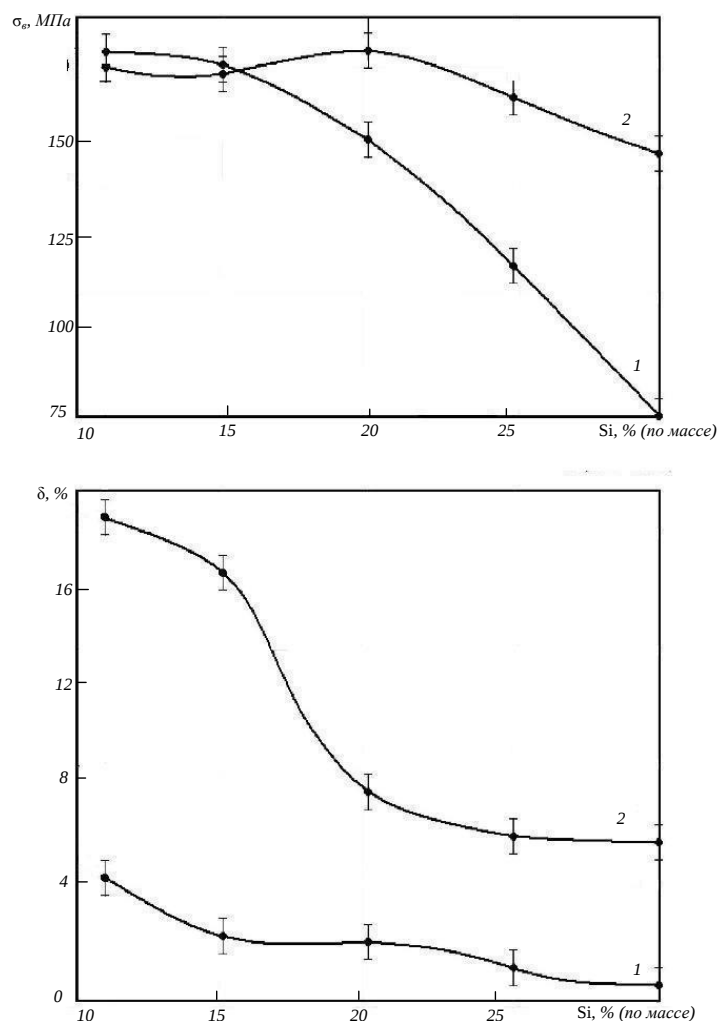


Рис. 5. Зависимость временного сопротивления разрыву (σ_b) и относительного удлинения (δ) образцов из силуминов в литом состоянии (1) и после отжига при 500 °С в течение 2 ч и горячейковки ($K_{\text{общ}} = 28$) (2)

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.