УДК 669.715:620.186.5:621.735.34

В.В. Каверинский¹, А.И. Троцан¹, З.П. Сухенко¹¹ Институт проблем материаловедения НАН Украины

ПОВЫШЕНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ ДОЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА ЗА СЧЁТ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Целью данной работы является разработка метода деформационно-термической обработки доэвтектических сплавов системы Al-Si, позволяющего измельчить и сфероидизировать включения кремния, тем самым повысив пластичность материала и его способность к упрочнению при последующей холодной деформации. Производилось изготовление отливок из сплава Al-Si (7 % Si) в лабораторных условиях: литьё в земляную форму при температуре расплава 700 – 720 °С. Отливки подвергались деформации ковкой – вытяжке. Исследование микроструктуры в литом, отожжённом и деформированном состояниях. Определение механических свойств: измерение твёрдости, испытание на осаживание. Предложен метод деформационно-термической обработки сплавов системы Al-Si, позволяющей добиться сфероидизации включений кремния. Метод позволяет в значительной мере повысить пластичность материала (до значений ~ 80 % при осаживании) при твёрдости соответствующей отожжённому состоянию. Определена зависимость размера и степени вытянутости включений кремния в составе Al-Si эвтектики в сплавах Al-Si с 7 % Si от параметров деформационно-термической обработки, получены статистические характеристики распределения включений по размерам. Показана возможность дополнительного упрочнения доэвтектических силуминов после сфероидизирующей деформационно-термической обработки за счёт холодной пластической деформации, так как повышенный запас пластичности позволяет получить большие степени деформации в холодном состоянии, чем того допускает литой или отожжённый материал. Показана возможность создания пластичных сплавов системы Al-Si путём деформационно-термической обработки, а также возможность варьирования, при необходимости, показателей твёрдости и пластичности в значительно более широких пределах, чем в литом состоянии.

DOI: 10.34185/0543-5749.2020-3-48-58

Введение

Сплавы системы Al-Si, известные как силумины, широко применяются в качестве материалов для отливок, так как они имеют хорошие литейные свойства [1]. Однако известным недостатком силуминов является их низкая пластичность, обусловленная грубыми крупными включениями кремния. Очевидно, что, повлияв на морфологию кремниевых включений, можно воздействовать на свойства силумина. Известны способы модифицирования кремниевых включений в силумине с применением микродобавок

Na [2] или Li [3]. Но этот способ не приводит к росту пластичности, необходимому для перехода материала на качественно новый уровень, кроме того, известно, что примеси Na в сплавах на основе алюминия повышают горячеломкость материала [4].

На форму включений хрупкой фазы можно повлиять воздействием горячей деформации. На данный момент имеются лишь немногочисленные упоминания о возможности деформационной обработки Al-Si сплавов, например, в работе [5], где силумин подвергался горячей экстру-

зии с очень низкой скоростью. При этом включения кремния, действительно, подверглись дроблению и измельчению.

В основе предлагаемого метода лежит тот факт, что силумин всё же обладает некоторой пластичностью, особенно доэвтектический. Пластичность можно дополнительно повысить при нагревании и при отсутствии факторов горячеломкости проводить некоторую пластическую деформацию при температурах выше $\sim 470^\circ\text{C}$ [4]. В предлагаемом методе деформация осуществлялась циклически – чередование малых горячих деформаций и подогревов с некоторым отжигом. Таким способом поддерживалась пластичность материала.

Важным эффектом, которого предполагалось достичь применением циклического нагрева/охлаждения, являлось ускорение сфероидизации разрушенных при деформации включений кремния за счёт изменения растворимости Si в Al [6].

Цель данной работы – исследование метода повышения пластичности доэвтектического силумина с применением деформационно-термической обработки, способствующей измельчению, перемешиванию и сфероидизации

включений кремния.

Исследуемый материал

Исследовано 4 типа образцов в литом, деформированном и отожжённом состояниях. Химический состав приведен в таблице 1.

Таблица 1. Состав материала исследованных образцов, масс. %

Al	Si	Mn	Cu	Fe
основа	7,0	0,1	0,5	0,75

Исходный металл доводился до плавления в стальном тигле и разливался при температуре около $700 - 720^\circ\text{C}$ в высушенные формы из песчано-глинистой формовочной смеси.

Методика эксперимента

Образцы были подвергнуты различным режимам обработки, а также исследовались в литом состоянии. Вид обработки для каждого из образцов приведен в таблице 2. Изменение степени деформации по этапам для данных образцов показано на рисунке 1. Деформация на каждом этапе начиналась как горячая, но завершалась при более низких температурах.

Таблица 2. Режимы обработки образцов

№ типа образцов	Характеристика обработки	Конечные размеры (усреднено по длине), мм		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>l</i>
1	11 этапов деформации ковкой (вытяжка) с промежуточными отжигами в течении 12 – 18 мин при температуре 520°C . Началоковки при $520 - 510^\circ\text{C}$, завершениековки при $\sim 250 - 300^\circ\text{C}$. Суммарная степень деформации $\sim 29\%$, удлинение $\sim 42\%$	7,9	6,8	60,6
2	17 этапов деформации ковкой (вытяжка) с промежуточными отжигами в течении 10 – 12 мин при температуре 510°C . Началоковки при $510 - 490^\circ\text{C}$, завершениековки при $\sim 200 - 250^\circ\text{C}$. Суммарная степень деформации $\sim 52\%$, удлинение $\sim 98\%$	6,45	5,75	81,0
3	Отжиг при температуре $520 - 540^\circ\text{C}$ в течении 4,5 ч	9,4	8,7	41,5
4	Исследовался в литом состоянии	8,8	8,4	40,8

Рис.1. Степени деформации по этапам

Результаты исследования

Дендритная структура образцов типа 4 (литое состояние) показана на рисунке 2 (а, б). Структура является типичной для доэвтекктического силумина. Междендритное пространство заполнено Al-Si эвтектикой. Характерные фотографии включений Si приведены на рисунке 3 (а, б, в). Они в основном имеют на шлифе типичную вытянутую форму.

Влияние отжига без дополнительной

деформации изучали на образцах типа 3. Дендритная структура после отжига таких образцов представлена на рисунке 2 (в, г). Дендритный характер структуры после отжига сохраняется. Можно говорить о существенном укрупнении дендритной структуры после отжига. Характерные фотографии включений приведены на рисунке 3 (г, д). Визуально существенного различия в морфологии включений в литых и отожжённых образцах не наблюдается.

Рис. 2. Микроструктура в литом и отожжённом состояниях: а) литое состояние увеличение $\times 40$; б) литое состояние увеличение $\times 100$; в) отожжённое состояние увеличение $\times 40$; г) отожжённое состояние увеличение $\times 100$

Рис. 3. Включения кремния в литом и отожжённом состояниях: а) литое состояние, увеличение $\times 400$; б) литое состояние, увеличение $\times 500$; в) литое состояние, увеличение $\times 1000$; г) отожжённое состояние, увеличение $\times 400$; д) отожжённое состояние, увеличение $\times 1000$

Влияние деформации с промежуточными отжигами на структуру силумина изучали на образцах типов 1 и 2. На рисунке 4 (а, б) представлена микроструктура образца типа 1. После подобной деформации структура сохраняет подобие дендритного характера и визуально близка к структуре после отжига, но очертания дендритов выражены несколько слабее. Показатели структуры очень близки к таковым в отожжённом состоянии.

Характерные фотографии кремниевых включений приведены на рисунке 5 (а, б). Заметно изменение формы и размеров включений, по сравнению с литым или отожжённым состоянием. Наблюдается существенное измельчение кремниевых включений и их некоторая сфероидизация. Некоторые из включений достаточно толстые и имеют форму галтованных осколков. Таким образом, деформация, действительно, приводит к появлению более коротких и более округлых включений, в сравнении с литым или отожжённым состоянием.

Образцы типа 2 подвергали деформации с большей степенью по несколько другому режиму, чем образцы типа 1. На рисунке 4 (в, г) представлена их микроструктура. Даже после

такой деформации структура не утратила полностью следов дендритного характера, однако он становится менее выраженным, начинает проявляться текстура деформации. После деформации 52 % структура получается несколько более плотная, чем после деформации 29 %, однако зерно всё равно заметно крупнее, чем в литом состоянии. Характерные фотографии включений кремния приведены на рисунке 5 (в, г).

Включения кремния в образцах типа 2 значительно более мелкие и многие имеют форму, близкую к сферической или эллиптической. Будучи в значительной мере фрагментированными в процессековки, эти включения подверглись существенной сфероидизации. Таким образом, такой режим деформации в сравнении с предыдущим (образцы типа 1) и отжигом без деформации позволяет получить мелкие и практически сферические включения кремния.

Распределение кремниевых включений по размерам является логнормальным. Статистические характеристики функций распределения приведены в таблице 3.

Ниже приведена сводная таблица 4 показателей микроструктуры образцов.

Рис. 4. Микроструктура образцов после деформационно-термической обработки: а) суммарная степень деформации ~29 %, увеличение $\times 40$; б) суммарная степень деформации ~29 %, увеличение $\times 100$; в) суммарная степень деформации ~52 %, увеличение $\times 40$; г) суммарная степень деформации ~52 %, увеличение $\times 100$;

Рис. 5. Включения кремния в образцах после деформационно-термической обработки: а) суммарная степень деформации ~29 %, увеличение $\times 400$; б) суммарная степень деформации ~29 %, увеличение $\times 1000$; в, г) суммарная степень деформации ~52 %, увеличение $\times 1000$

Таблица 3. Статистические характеристики распределения кремниевых включений по размерам

№	Продольный размер, мкм					Поперечный размер, мкм				
	Параметры распределения		Математическое ожидание	Дисперсия	Медиана	Параметры распределения		Математическое ожидание	Дисперсия	Медиана
	μ	σ				μ	σ			
1	2,07	0,67	9,9	55,7	7,9	1,46	0,45	4,8	5,1	4,3
2	1,38	0,53	4,6	3,6	4,0	1,06	0,42	3,2	1,9	2,8
3	2,72	0,54	17,6	104,4	15,2	1,54	0,46	5,2	6,3	4,7
4	2,80	0,51	18,7	104,2	16,4	1,35	0,50	4,4	5,4	3,9

Таблица 4. Характеристики микроструктуры

№ типа образцов	Плотность структуры, мм ⁻²	Средний условный размер зерна, мкм	Характеристики включений кремния		
			Длина, мкм	Толщина, мкм	Степень вытянутости
1	211,8 ± 36,1	73,8 ± 6,1	10,0 ± 0,6	4,8 ± 0,2	2,1
2	278,5 ± 53,7	66,0 ± 7,9	4,5 ± 0,2	3,2 ± 0,1	1,4
3	210,6 ± 137,4	74,7 ± 25,4	17,5 ± 0,9	5,2 ± 0,2	3,4
4	727,7 ± 79,4	39,8 ± 2,1	18,7 ± 1,1	4,4 ± 0,3	4,3

Для оценки влияния отжига и деформационно-термической обработки на свойства сплава в образцах измеряли микротвёрдости металлической матрицы, исключив влияние включений. Также проводили измерение общей твёрдости (НВ). Для оценки пластичности проводили технологическое испытание на осаживание. Осаживание осуществляли при комнатной температуре (~ 20 °С). Оценивали критическую степень осаживания как отношение к исходной высоте разницы исходной высоты образца в направлении осаживания и его высоты при появлении первых видимых трещин.

В таблице 6 приведены результаты измерений указанных механических характеристик образцов. Из таблицы 6 видно, что деформационно-термическая обработка заметно способствует повышению пластичности материала. При увеличении степени деформации общая твёрдость практически не менялась и близка к таковой в отожжённом состоянии. Можно говорить о некотором возрастании микротвёрдости металлической матрицы по мере увеличения деформации. Твёрдость деформированного материала оказалась меньше, чем в литом состоянии.

Таблица 6. Сравнение механических свойств образцов

№ типа образцов	Микротвёрдость металлической матрицы, кгс/мм ²	Твёрдость, НВ	Степень осаживания до появления трещин (при 20 °С), %
1	41,8 ± 3,8	50,2 ± 8,2	77,2
2	48,2 ± 9,8	50,3 ± 8,3	83,3
3	43,4 ± 3,4	49,2 ± 1,3	52,8
4	54,8 ± 5,9	67,0 ± 12,1	39,7

Проводили также измерение твёрдости образцов после осаживания до появления трещин. Фактически, это максимальная твёрдость, которую можно достичь в данном материале за счёт

дополнительной холодной деформации. Более сильный наклёп будет сопровождаться разрушением. Значения твёрдости приведены в таблице 7.

Таблица 7. Значения твёрдости после холодного осаждения до появления трещин

№ типа образцов	Твёрдость, НВ
1	$104,4 \pm 13,7$
2	$112,7 \pm 13,1$
3	$86,7 \pm 6,4$
4	$83,9 \pm 12,9$

Из представленных в таблице 7 результатов видно, что более пластичные образцы способны выдержать большую степень осаждения при холодной деформации при этом приобретают и большую твёрдость за счёт более сильного наклёпа. Таким образом, хотя образцы типа 4 (литое состояние) и имеет большую твёрдость, но резерв её дополнительного повышения за счёт наклёпа мал в силу низкой пластичности. Несмотря на исходную невысокую твёрдость (близкую к отожжённому состоянию) образцы типов 1 и 2 имеют большой резерв для её повышения за счёт наклёпа при холодной деформации, которого лишены как литые, так и отожжённые образцы.

Обсуждение результатов

Наблюдаемое повышение пластичности можно связать, в первую очередь, с изменением формы включений кремния в структуре материала. Вытянутые (пластинчатые) включения хрупкой фазы, которой является кремний, работают как микротрещины. Более того, будучи твёрже материала матрицы, при деформации включения подобной формы могут действовать как своеобразные микролезвия, прорезая окружающий металл торцевой стороной. Также следует учесть и тот фактор, что при разрушении вследствие деформации острые углы сколов будут работать как своеобразные концентраторы напряжений, облегчая хрупкое разрушение. Крупное и плоское включение гораздо проще и вероятнее разрушается при деформации, чем глобулярное или полиэдрическое, образуя те самые остроугольные сколы. Глобулярное включение не образует вокруг себя такой концентрации напряжений, как пластинчатое или осколочное, кроме того, будучи мелким, оно с меньшей вероятностью будет разрушено, образовав на месте себя осколки с остроугольными сколами. Наблюдаемое некоторое повышение пластичности при обычном отжиге, вероятно, связано в первую очередь с повышением пластичности металлической матрицы, сопровождающимся снижением её твёрдости. Последний фактор

также имел место и для образцов после деформационно-термической обработки, но скорее как дополнительный. В пользу гипотезы о преобладающей роли формы включений в повышении пластичности говорит тот факт, что отожжённые образцы оказались способными быть наклёпанными в холодном состоянии до значений твёрдости, мало отличающихся от тех, до которых может быть наклёпан литой материал.

Механизм сфероидизации включений в ходе деформационно-термической обработки видится следующим. Изначальное пластинчатое включение разрушается под действием деформации на осколочные фрагменты. Материал металлической матрицы в горячем состоянии весьма пластичен и образовавшиеся остроугольные сколы включений не разрушают его за счёт образования микротрещин. В ходе промежуточных отжигов возникшие возможные концентрации напряжений на месте сколов включений устраняются. Не исключается и «залечивание» в ходе этих отжигов и закрытых микротрещин, но для этого предположения нет достаточных подтверждений. В некоторой степени острые углы фрагментов включений устраняются при высокой температуре за счёт коагуляции, но значительную роль здесь играет также цикличность изменения температуры в ходе обработки. Так как растворимость кремния в алюминии заметно изменяется от температуры (при температуре нагрева под деформацию и отжиге она составляет около 1 %, а при комнатной температуре – менее 0,01 %). Таким образом, при нагреве включения частично подрастворяются, причём угловые участки растворяются быстрее. При охлаждении в ходе деформации и некоторое время после неё (в ходе измерения размеров образцов и транспортировки обратно в печь) происходит обратное осаждение кремния из твёрдого раствора на поверхность включений, которое протекает уже относительно равномерно по их поверхности. Таким образом, циклическое изменение температуры в ходе данной обработки дополнительно способствует сфероидизации включений.

Выводы

1. Установлено, что предложенный метод деформационно-термической обработки сплавов системы Al-Si приводит к существенному измельчению включений кремния и их сфероидизации, которая возрастает при увеличении степени деформации.

2. Отжиг при температуре 520 – 540 °C в течение 4,5 ч не приводит к сколь-нибудь заметной сфероидизации включений. Это показывает важную роль деформации в данном процессе деформационно-термической обработки, позволяющей не только сфероидизировать включения Si, но и измельчить их.

3. Предложенный режим деформационно-термической обработки сплавов системы Al-Si позволяет в значительной мере увеличить их пластичность, в гораздо большей степени, чем отжиг.

4. Твёрдость образцов после деформационно-термической обработки снижается по сравнению с литым состоянием до уровня показателей отожжённой отливки. При этом суммарная степень деформации при деформационно-термической обработке практически не оказывает влияния на общую твёрдость.

5. Твёрдость материала можно повысить за счёт наклёпа при холодной пластической деформации. При этом, так как материал после деформационно-термической обработки оказывается более пластичным, имеются большие резервы для упрочнения данным способом.

Библіографічний список

1. Захаров А. М. Промышленные сплавы цветных металлов. Фазовый состав и структурные составляющие. М.: Металлургия, 1980. 256 с.
2. Скоробагатко Ю. П. Модифицирование заэвтектических алюминиевых сплавов с применением активных добавок. *Металл и литьё Украины*. 2009. № 9. С. 19–28.
3. Семенихин Б. А., Петридис В. А., Куприянова И. Ю. Возможность использования

комплексного модификатора длительного действия на основе нанопорошков для повышения качества отливок из алюминиевых сплавов. *Новые материалы и технологии в машиностроении*. 2005. № 4. С. 110–113.

4. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. Пер с англ. М.: Металлургия, 1979. 640 с.

5. Su-Seong Ahn, Sharief Pathan, Jar-Myung Koo, Chang-Hyun Baeg, Chan-Uk Jeong, Hyoen-Taek Son, Yong-Ho Kim, Kap-Ho Lee, Soon-Jik Hong. Enhancement of the Mechanical Properties in Al-Si-Cu-Fe-Mg Alloys with Various Processing Parameters. *Materials*. 2018. № 11. P. 2150–2162.

6. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3 т. Т. 1 / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996. 992 с.

References

1. Zakharov, A. M. (1980). *Promyshlennyye splavy tsvetnykh metallov. Fazovyi sostav i strukturnye sostavlyaiushchie*. Moskva: Metallurgiya
2. Skorobagatko, Yu. P. (2009). Modifitsirovaniye zaevtekticheskikh aluminievyykh splavov s primeneniem aktivnykh dobavok. *Metall i lite Ukrainy*. (9), 19-28
3. Semnikhin, B. A., Petridis, V. A., & Kupriyanova, I. Yu. (2005). Vozmozhnost ispolzovaniia kompleksnogo modifikatora dlitel'nogo deistviia na osnove nanoporoshkov dlia povysheniia kachestva otlivok iz aluminievyykh splavov. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii*. (4), 110-113
4. Mondolfo, L. F. (1979). *Struktura i svoistva aluminievyykh splavov*. Moskva: Metallurgiya
5. Ahn, Su-Seong, Pathan, Sharief, Koo, Jar-Myung, Baeg, Chang-Hyun, Jeong, Chan-Uk, Son, Hyoen-Taek ... Hong, Soon-Jik. (2018). Enhancement of the Mechanical Properties in Al-Si-Cu-Fe-Mg Alloys with Various Processing Parameters. *Materials*. 11(11), 2150- 2162
6. Liakishev, N. P. (Ed.). (1996). *Diagrammy sostoianiia dvoynykh metallicheskiykh sistem. Spravochnik* (Vol. 1). Moskva: Mashinostroenie

Каверинський Владислав Володимирович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу № 36 Інституту проблем матеріалознавства НАН України (м. Київ, Україна). ORCID ID: 0000-0002-6940-579X. E-mail: insamhlaithe@gmail.com

Троцан Анатолій Іванович, доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник відділу № 36 Інституту проблем матеріалознавства НАН України (м. Київ, Україна). ORCID ID: 0000-0002-1435-5377. E-mail: tai1065@mail.ru

Сухенко Зоя Павлівна, головний конструктор відділу №36 Інституту проблем матеріалознавства НАН України (м. Київ, Україна). ORCID ID: 0000-0001-8578-5473. E-mail: hisie@ukr.net

ПІДВИЩЕННЯ ПЛАСТИЧНОСТІ ДООБТЕКТИЧНОГО СИЛУМІНУ ЗА РАХУНОК ДЕФОРМАЦІЙНО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Мета. Розробити метод деформаційно-термічної обробки дообтектичних сплавів системи Al-Si, що дозволяє подрібнити і сфероїдизувати включення кремнію, тим самим підвищивши пластичність матеріалу і його здатність до зміцнення при подальшій холодній деформації.

Методика. Виготовлення виливків зі сплаву Al-Si (7 % Si) в лабораторних умовах: лиття в земляну форму при температурі розплаву 700 – 720 °С. Виливки піддавалися деформації куванням - витяжці. Дослідження мікроструктури в литому, що відпалюють і деформованому станах. Визначення механічних властивостей: вимір твердості, випробування на осаджування.

Результати. Розроблено метод деформаційно-термічної обробки сплавів системи Al-Si (дообтектичних силумінів), що полягає в серії малих гарячих деформацій (початок деформації при 510 – 540 °С) з проміжними відпалами при температурі вище 500 °С протягом 10 – 20 хв кожен. Метод дозволяє отримати ступені деформації більше 50 % для даного класу сплавів, що характеризуються низькою пластичністю в литому стані. В ході даної деформаційно-термічної обробки в структурі сплавів системи Al-Si відбувається суттєве подрібнення включень кремнію і їх сфероїдизація, яка зростає при збільшенні ступеня деформації, а також запропонований спосіб дозволяє більш рівномірно перемішати включення кремнію в металевій матриці. Як за умов звичайного, так і циклічного (з чергуванням нагріву і охолодження) відпалу не досягається одночасне і настільки виражене подрібнення і сфероїдизація включень кремнію, що показує важливу роль деформації в розробленому процесі деформаційно-термічної обробки, що дозволяє не тільки більшою мірою сфероїдизувати включення Si, але і подрібнити їх. Показано, що розроблений режим деформаційно-термічної обробки сплавів системи Al-Si дозволяє значною мірою збільшити їх пластичність, в набагато більшому ступені, ніж відпал. Твердість зразків після деформаційно-термічної обробки знижується в порівнянні з литим станом до рівня показників відпаленої виливки. При цьому сумарна ступінь деформації при деформаційно-термічної обробки практично не чинила впливу на загальну твердість (хоча дещо зростала мікротвердість металевої матриці). Твердість матеріалу можна підвищити за рахунок наклепу при холодній пластичній деформації. При цьому, так як матеріал після деформаційно-термічної обробки виявляється більш пластичним, він має великі резерви для зміцнення даними способом. Таким чином, хоча деформаційно-термічна обробка і знижує твердість у порівнянні з литим станом, вона за рахунок підвищення пластичності створює резерв для набагато більшого зміцнення матеріалу за рахунок холодної пластичної деформації, ніж цього можна досягти для литого або відпаленого матеріалу.

Наукова новизна. Визначено залежність розміру і ступеня витягнутості включень кремнію в складі Al-Si евтектики у сплавах Al-Si з 7 % Si від параметрів деформаційно-термічної обробки, отримані статистичні характеристики розподілу включень за розмірами. Показана можливість додаткового зміцнення дообтектичних силумінів після сфероїдизуючої деформаційно-термічної обробки за рахунок холодної пластичної деформації, так як підвищений запас пластичності дозволяє отримати великі ступені деформації в холодному стані, ніж того допускає литий або відпалений матеріал.

Практична цінність. Показана можливість створення пластичних сплавів системи Al-Si (силумінів) шляхом деформаційно-термічної обробки, а також можливість варіювання, при необхідності, показників твердості і пластичності в значно більш широких межах, ніж у литому стані.

Ключові слова: алюміній, силумін, деформаційно-термічна обробка, мікроструктура, пластичність.

Vladislav Kaverinsky, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of Department No. 36 of the Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine). ORCID ID: 0000-0002-6940-579X. E-mail: insamhlaithe@gmail.com

Anatoly Trotsan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of Department No. 36 of the Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv,

Ukraine). ORCID ID: 0000-0002-1435-5377. E-mail: tai1065@mail.ru

Zoya Sukhenko, Chief Constructor of Department No. 36 of the Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, (Kyiv, Ukraine). ORCID ID: 0000-0001-8578-5473. E-mail: hisie@ukr.net

INCREASING THE PLASTICITY OF HYPOEUTECTIC SILUMIN DUE TO DEFORMATION-HEAT TREATMENT

Purpose. To develop a method of deformation-heat treatment of hypoeutectic alloys of the Al-Si system, which makes it possible to grind and spheroidize silicon inclusions, significantly increasing the plasticity of the material and its ability to harden during subsequent cold deformation.

Methods. Manufacturing of castings from Al-Si alloy (7 % Si) in laboratory conditions: casting into an earth mold at a melt temperature of 700 – 720 °C. The castings were subjected to deformation by forging – drawing. Investigation of the microstructure in the cast, annealed and deformed states. Determination of mechanical properties: measurement of hardness, upsetting test.

Results. A method has been developed of deformation-heat treatment of Al-Si alloys (hypoeutectic silumins), which consists of a series of small hot deformations (the beginning of deformation at 510 – 540 °C) with intermediate annealing at temperatures above 500 °C for 10 – 20 minutes each. The method allows one to obtain the degree of deformation of more than 50 % for this class of alloys, known with their low ductility in the cast state. In the course of this deformation-heat treatment in the structure of alloys of the Al-Si system, there is a significant refinement of silicon inclusions and their spheroidization, which increases with an increase in the degree of deformation, and the proposed method also allows more uniform mixing of silicon inclusions in the metal matrix. Both conventional and cyclic (with alternating heating and cooling) annealing does not allow obtaining such a degree of simultaneous grinding and spheroidization of silicon inclusions, which shows the important role of deformation in the developed process of deformation-heat treatment, which allows not only to a greater extent to spheroidize Si inclusions, but and grind them up. It is shown that the developed mode of deformation-heat treatment of alloys of the Al-Si system makes it possible to significantly increase their plasticity, to a much greater extent than annealing. The hardness of the specimens after deformation-heat treatment decreases in comparison with the cast state to the level of indicators of annealed casting. At the same time, the total degree of deformation during deformation-heat treatment had practically no effect on the total hardness (although the microhardness of the metal matrix increased somewhat). The hardness of the material can be increased by work hardening during cold plastic deformation. At the same time, since the material after deformation-heat treatment turns out to be more plastic, it has large reserves for strengthening by this method. Thus, although deformation-heat treatment reduces the hardness in comparison with the cast state, due to the increase in plasticity, it creates a reserve for much greater hardening of the material due to cold plastic deformation than can be achieved for a cast or annealed material.

Originality. The dependence of the size and degree of silicon inclusions elongation in the Al-Si eutectic in Al-Si alloys with 7 % Si on the parameters of deformation-heat treatment is determined, and statistical characteristics of the size distribution of inclusions are obtained. The possibility of additional hardening of hypoeutectic silumins after spheroidizing deformation-heat treatment due to cold plastic deformation is shown, since an increased plasticity margin allows one to obtain greater degrees of deformation in the cold state than is possible for a cast or annealed material.

Practical implications. The possibility of creating ductile alloys of the Al-Si system (silumins) by deformation-heat treatment is shown, as well as the possibility of varying, if necessary, the hardness and plasticity properties in a much wider range than in the as-cast state.

Keywords: aluminum, Al-Si alloy, deformation-heat treatment, microstructure, plasticity.

Каверинский Владислав Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела № 36 Института проблем материаловедения НАН Украины (г. Киев, Украина). ORCID ID: 0000-0002-6940-579X. E-mail: insamhlaithe@gmail.com

Троцан Анатолий Иванович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела № 36 Института проблем материаловедения НАН Украины (г. Киев, Украина). ORCID ID: 0000-0002-1435-5377. E-mail: tai1065@mail.ru

Сушенко Зоя Павловна, главный конструктор отдела №36 Института проблем материаловедения НАН Украины (г. Киев, Украина). ORCID ID: 0000-0001-8578-5473. E-mail: hisie@ukr.net

ПОВЫШЕНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ ДОЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА ЗА СЧЁТ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Цель. Разработать метод деформационно-термической обработки доэвтектических сплавов системы Al-Si, позволяющий измельчить и сфероизировать включения кремния, тем самым повысить пластичность материала и его способность к упрочнению при последующей холодной деформации.

Методика. Изготовление отливок из сплава Al-Si (7 % Si) в лабораторных условиях: литьё в земляную форму при температуре расплава 700 – 720 °С. Отливки подвергались деформации ковкой – вытяжке. Исследование микроструктуры в литом, отожжённом и деформированном состояниях. Определение механических свойств: измерение твёрдости, испытание на осаживание.

Результаты. Разработан метод деформационно-термической обработки сплавов системы Al-Si (доэвтектических силуминов), заключающийся в серии малых горячих деформаций (начало деформации при 510 – 540 °С) с промежуточными отжигами при температуре выше 500 °С в течении 10 – 20 мин каждый. Метод позволяет получить степени деформации более 50 % для данного класса сплавов, характеризующихся низкой пластичностью в литом состоянии. В ходе данной деформационно-термической обработки в структуре сплавов системы Al-Si происходит существенное измельчение включений кремния и их сфероидизация, которая возрастает при увеличении степени деформации, а также предложенный способ позволяет более равномерно перемешать включения кремния в металлической матрице. Как обычный, так и циклический (с чередующимися нагревами и охлаждениями) отжиг не позволяют получить такой степени одновременного измельчения и сфероидизации включений кремния, что показывает важную роль деформации в разработанном процессе деформационно-термической обработки, позволяющей не только в большей степени сфероидизировать включения Si, но и измельчить их. Показано, что разработанный режим деформационно-термической обработки сплавов системы Al-Si позволяет в значительной мере увеличить их пластичность, в гораздо большей степени, чем отжиг. Твёрдость образцов после деформационно-термической обработки снижается по сравнению с литым состоянием до уровня показателей отожжённой отливки. При этом суммарная степень деформации при деформационно-термической обработке практически не оказывала влияния на общую твёрдость (хотя несколько возрастала микротвёрдость металлической матрицы). Твёрдость материала можно повысить за счёт наклёпа при холодной пластической деформации. При этом, так как материал после деформационно-термической обработки оказывается более пластичным, он имеет большие резервы для упрочнения данным способом. Таким образом, хотя деформационно-термическая обработка и снижает твёрдость по сравнению с литым состоянием, она за счёт повышения пластичности создаёт резерв для гораздо большего упрочнения материала за счёт холодной пластической деформации, чем этого можно достичь для литого или отожжённого материала.

Научная новизна. Определена зависимость размера и степени вытянутости включений кремния в составе Al-Si эвтектики в сплавах Al-Si с 7 % Si от параметров деформационно-термической обработки, получены статистические характеристики распределения включений по размерам. Показана возможность дополнительного упрочнения доэвтектических силуминов после сфероидизирующей деформационно-термической обработки за счёт холодной пластической деформации, так как повышенный запас пластичности позволяет получить большие степени деформации в холодном состоянии, чем того допускает литой или отожжённый материал.

Практическая значимость. Показана возможность создания пластичных сплавов системы Al-Si (силуминов) путём деформационно-термической обработки, а также возможность варьирования, при необходимости, показателей твёрдости и пластичности в значительно более широких пределах, чем в литом состоянии.

Ключевые слова: алюминий, силумин, деформационно-термическая обработка, микроструктура, пластичность.

Рукопис надійшов 09.07.2020 р.