

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.771:621.777

Усынина Г.П., Загиров Н.Н., Аникина В.И.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИЦИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРУТКОВОЙ ЛИГАТУРЫ ИЗ СТРУЖКОВЫХ ОТХОДОВ СИЛУМИНА

Рассмотрен один из вариантов модифицирования доэвтектических силуминов, основанный на предположении о возможном измельчении зерна α -твердого раствора за счет введения в расплав полученных по специальной схеме прутков-модификаторов из сортовой сыпучей стружки того же сплава, что и модифицируемый материал. Основными преимуществами такого способа являются сохранение химического состава сплава после введения модификатора, а также рациональное использование образующихся на базовом производстве в большом объеме стружковых отходов. Проведенные на действующем предприятии эксперименты по оценке модифицирующей способности полученных по разработанной схеме прутков и проволоки позволили сделать вывод о возможности достижения положительного эффекта в измельчении включений кремния в эвтектике в процессе литья под низким давлением заготовок алюминиевых автомобильных дисков колес при введении данной лигатуры.

Ключевые слова: стружка, силумин, прут, проволока, расплав, модифицирование, структура, отливка, эвтектика, лигатура.

The article studies one the ways of hypoeutectic silumin inoculation, based on the assumption of possible refinement of α -solid grain by rod-modifiers made of graded granular chips of the same alloy as the modifiable material. The main advantage of this method is that the chemical composition of the alloy remains unchanged after the addition of alloying element. Furthermore, it helps the rational use of large amount of chip scrap. The experiments on the inoculating ability of rods and wire were carried out at the operating enterprise and they led to the positive result in refinement of inclusions in eutectic silicon in low pressure casting of aluminum automobile wheel rims with the addition of alloying element.

Keywords: chip, silumin, rod, wire, melt, modification, structure, ingot, eutectic, alloying element.

Как известно [1], в доэвтектических силуминах, к которым относится сплав АК12, основное влияние на механические характеристики оказывает морфология кремниевых кристаллов в эвтектике – чем они дисперснее, тем выше как прочностные, так и пластические свойства материала. Кремний при затвердевании эвтектики в сплаве АК12, как правило, выделяется в виде нежелательных грубых кристаллов игольчатой и пластинчатой формы, которые играют роль внутренних надразов в пластичном α -твердом растворе. Сплавы с такой структурой обладают низкими механическими свойствами, что может приводить к снижению эксплуатационных характеристик изделий.

Для улучшения структуры, повышения механических и технологических свойств силуминов перед разливкой их подвергают модифицированию. Из существующих модификаторов алюминий-кремниевой эвтектики наибольшее предпочтение в настоящее время уделяется использованию лигатуры AlSi10.

Введение стронциевой лигатуры приводит к модифицированию кремниевой фазы от формы крупных пластин в составе эвтектики до тонкодифференцированного, широкоразветвленного дендрита за счет увеличения степени разветвленности и уменьшения толщины ветвей эвтектического бикристалла, что улучшает качество отливки, повышая ее прочность и, особенно, пластичность.

Однако поиск новых модификаторов и более совершенного механизма модифицирования продолжают. Свидетельством тому является совершенно новый подход к его описанию, основанный на представлениях о кластерном строении жидкого кристаллизующегося металла [2].

Согласно данной теории предполагается возможным измельчение зерна α -твердого раствора за счет вве-

дения прутков-модификаторов из того же сплава, что и модифицируемый материал. Такие модификаторы во-первых, не содержат специально вводимых элементов. А во-вторых, при растворении прутков в кристаллизующемся металле используют их способность влиять на состояние кластерной структуры кристаллизующегося слитка, что и обеспечивает модифицирование сплава.

Таким образом, одной из основных причин получения мелкого зерна является процесс гомогенного зарождения центров кристаллизации основного вещества в результате преобразования кластеров в устойчивые зародыши, число которых в переохлажденной жидкости несоизмеримо больше, чем число любых инородных частиц, вводимых в расплав с модификаторами [3].

Разработанный кластерный механизм модифицирования алюминиевых сплавов был использован при исследовании модифицирующей способности прутков и проволоки из стружковых отходов сплава АК12. Учитывая двухфазность такого материала, можно было ожидать роста числа и уменьшения размерных характеристик как основного алюминиевого твердого раствора, так и эвтектических колоний.

В общем виде схема изготовления прутков модифицирующего назначения приведена на **рис. 1**, где указаны также и основные параметры осуществления той или иной операции технологической цепочки [4].

Для проверки потенциальной возможности использования полученных по предлагаемой схеме прутков в качестве модификаторов на предприятии ООО «КиК» был проведен эксперимент, который заключался в следующем: прут $\varnothing 8$ мм, полученный методом горячей экструзии из стружки сплава АК12, вводили в расплав силумина. Работа проводилась с приготовлением плавов в лабораторной печи с шамотовым тиглем емкостью 3 кг и отливкой проб $\varnothing 50$ мм.

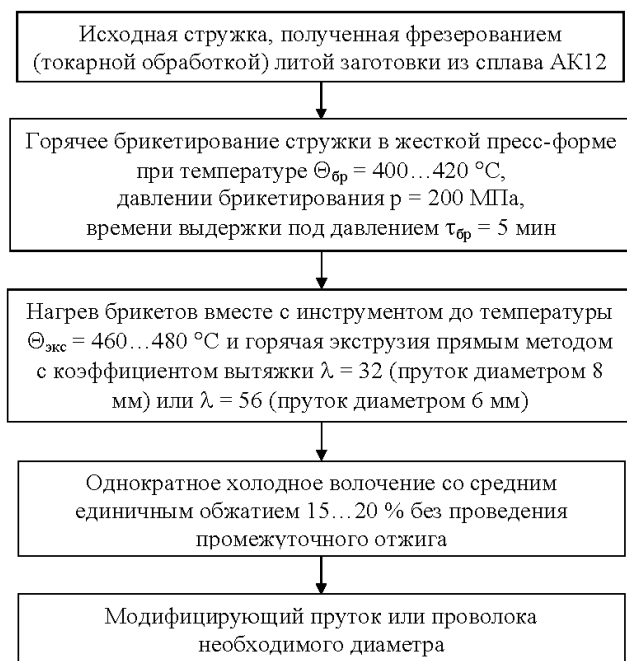


Рис. 1. Общая технологическая схема получения модифицирующего прутка из стружки сплава АК12

На рис. 2 представлена структура вводимого в расплав прутка.

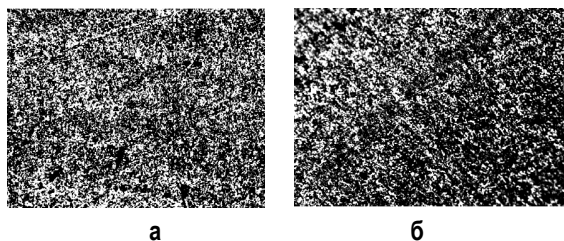


Рис. 2. Характерная микроструктура прутка диаметром 8 мм в продольном (а) и поперечном (б) сечениях, $\times 320$

Структура прутка имеет достаточно однородное и плотное строение с небольшой микронесплошностью и дисперсными включениями кремниевых частиц.

В табл. 1 приведен химический состав сплава AlSi10, не модифицированного алюминий-стронцевой лигатурой и приготовленного с использованием в качестве модификатора разного количества прутка $\varnothing 8$ мм из стружковых отходов сплава АК12.

Таблица 1

Химический состав сплава AlSi10 с разным количеством введенного прутка из стружки АК12

Номер пробы	Количество вводимого прутка, %	Содержание (помимо Al) химических элементов в сплаве, %						
		Si	Fe	Mg	Ti	Ca	Na	Sr
1	0	9.80	0.086	0.0001	0.0057	0.0008	0.0004	0.0003
2	1.35	9.85	0.092	0.0018	0.0082	0.0008	0.0003	0.0005
3	4.35	9.97	0.092	0.0029	0.013	0.0008	0.0003	0.0009

Анализ структуры полученных отливок (рис. 3) показал, что с увеличением количества вводимого в

расплав прутка происходит заметное изменение морфологии и измельчение частиц кремния в эвтектике. Наименьший эффект измельчения получен при 1.35% содержании прутка в сплаве, а наибольший – при 4.35%. Объяснить данное явление можно, по-видимому, тем, что в расплаве создаются микрообъемы, в которых частицы обладают значительно меньшими, чем в основной массе, скоростями перемешивания, а следовательно, более низкими температурами. Количество «вымороженных» зон определяется статистическими законами распределения. Они формируются случайным образом за счет флуктуаций, находятся в квазиравновесии с окружающим их расплавом, распределены равномерно по всему объему расплава, имеют малое время жизни. В то же время при добавлении опытного прутка происходит термическое переохлаждение расплава, в результате которого доля подобных участков существенно увеличивается. В этих ограниченных микрообъемах, соизмеримых с межатомным расстоянием, сохраняется организованное расположение частиц, которое примерно повторяет характер размещения их в твердом металле. Такие упорядоченные группировки и называют сиботаксами или кластерами, на основе которых образуются зародыши твердого металла при кристаллизации.

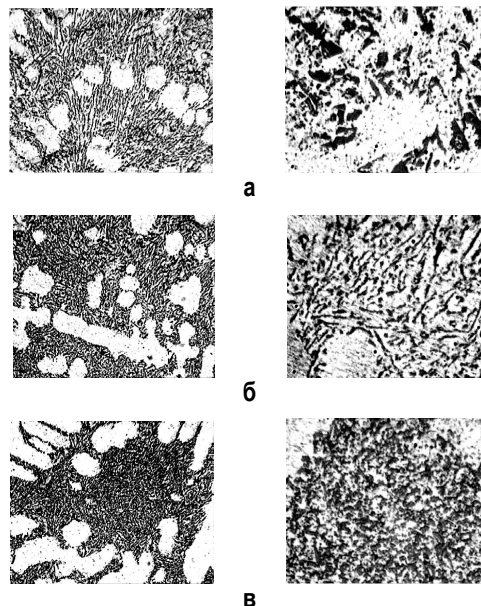


Рис. 3. Микроструктура сплава AlSi10 до введения прутка из стружковых отходов (а), после введения прутка в количестве 1.35% (б), после введения прутка в количестве 4.35% (в)

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что с увеличением числа кластеров растет количество центров зарождения эвтектических колоний кремниевых частиц, в которых они приобретают не игольчатую, а тонкоразветвленную форму, что благоприятно сказывается на механических и литейных свойствах отливок. Наличие в стружковых лигатурных прутках небольшого количества равномерно распределенного стронция обеспечивает реализацию модифицирующего эффекта в отношении ограничения роста ограненных кристаллов в эвтектике и повышения степени ветвления эвтектических бикристалльных колоний.

Применение для модифицирования прутка, изго-

товленного из стружковых отходов, дает определенные преимущества, среди которых можно выделить сохранение химического состава сплава после введения модификатора, а также использование большого количества отходов производства, образовавшихся при механической обработке деталей из того же сплава. В то время как использование других модификаторов, типа Al-Ti, Al-Ti-B, Al-Sr, приводит к загрязнению сплава интерметаллидами Al_3Ti , TiB_2 , $SrAl_4$, которые являются дополнительными концентраторами напряжений в отливках.

Кроме получения тонкодифференцированной эвтектики, в случае использования силуминового прутка из стружковых отходов в отливках также не наблюдается и образования, так называемой, «перемодифицированной» структуры. В перемодифицированных силуминах (при использовании модификаторов AlTiB и AlSr) на границах колоний эвтектики отмечается резкое огрубление структуры. В этих участках выделяются не только укрупненные частицы кремния, но и иглообразные железосодержащие фазы (рис. 4).

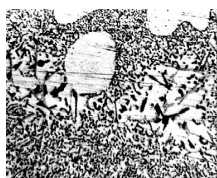


Рис. 4. Перемодифицированная структура при использовании модификаторов AlTiB и AlSr, x200

Грубые образования на границах эвтектических колоний становятся концентраторами напряжений и оказывают отрицательное влияние на усталостные и другие эксплуатационные свойства изделий. В частности, приводят к преждевременному образованию трещин при стендовых испытаниях автомобильных колес из сплава АК12 (табл. 2).

Таким образом, кластерная теория модифицирования при введении прутков из стружковых силуминовых отходов позволяет не только объяснить механизм измельчения частиц кремния в эвтектике Al+Si, но и подтверждает тот факт, что причиной образования перемодифицированной структуры в сплаве АК12 является введение специальных модификаторов типа AlTiB и AlSr.

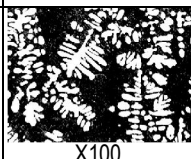
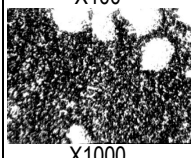
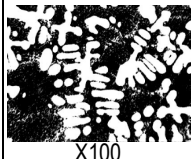
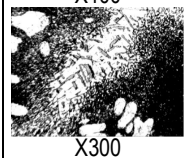
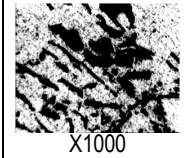
Стремление к увеличению количества центров кристаллизации на основе введения более диспергированного кремния позволило предположить, что гораздо эффективнее было бы использовать в качестве лигатуры не прессованный прут, а проволоку, полученную путем холодного волочения прутка, поскольку с увеличением степени деформации структура металла становится более равномерной и дисперсной, уменьшаются по размеру частицы кремния и, как следствие, большее их количество размещается в единице объема. Это, в свою очередь, может благоприятно повлиять на строение образуемых при растворении лигатуры кластеров, а соответственно, и на структуру кристаллизующегося расплава.

С целью изучения данного вопроса из прутка Ø8 мм была получена проволока Ø4.2, 4.95 и 6.2 мм.

Использование проволоки диаметром меньше 4.2 мм представлялось нецелесообразным, поскольку дальнейшее увеличение степени деформации проволоки не приводило к заметному качественному изменению ее структуры, а следовательно, не могло оказать дополнительного влияния на структуру образующихся кластеров. При этом усложнялся бы сам процесс производства проволоки, обусловленный необходимостью проведения дополнительных переходов волочения и промежуточных отжигов.

Таблица 2

Сравнительная оценка структуры и результаты стендовых испытаний колес, изготовленных по традиционной и предлагаемой схеме модифицирования

Название структуры	Структура	Результаты стендовых испытаний колес
Модифицированная прутком из стружковых отходов сплава АК12	 X100  X1000	Трещины отсутствуют
Перемодифицированная лигатурами Al-Ti-B и Al-Sr	 X100  X300  X1000	Трещины в колесах

Для проведения экспериментов были приготовлены 3 плавки в промышленной печи САТ-0.25. Пробы для исследования микроструктуры, определения химического состава и изучения механических свойств образцов отбирались до введения проволоки, после введения соответственно 1.5, 3 и 4.5% проволоки каждого из Ø6.2, 4.95 и 4.2 мм. Таким образом, представлялось возможным определить влияние степени деформации вводимой проволоки и ее количества на структуру и механические свойства получаемых отливок.

Отливка проб производилась в предварительно подогретый до 300°C кокиль. Это делалось для того, чтобы исключить влияние скорости охлаждения на степень модифицирования.

Химический состав и механические свойства отобранных проб приведены в табл. 3 и 4 соответственно.

Таблица 3

Химический состав опытных образцов

Исследуемая проба	Химический состав, вес%											
	Si	Fe	Cu	Mg	Ni	Zn	Ti	B	Pb	Sn	Sr	Al
Проволока Ø 4.2 мм												
До введения проволоки	11.21	0.260	0.0032	0.054	0.0014	0.0087	0.124	0.001	0.0025	0.0033	0.0022	88.1
1.5% введенной проволоки	11.18	0.277	0.0038	0.051	0.0017	0.0096	0.122	0.001	0.0026	0.0039	0.0015	88.1
3.0% введенной проволоки	11.22	0.296	0.0040	0.050	0.0018	0.0092	0.123	0.0009	0.0026	0.0037	0.012	88.1
4.5% введенной проволоки	11.07	0.200	0.0044	0.049	0.0016	0.0088	0.092	0.0006	0.0026	0.0035	0.00098	90.5
Проволока Ø 4.95 мм												
До введения проволоки	10.85	0.237	0.0015	0.044	0.0026	0.0110	0.091	0.0008	0.0027	0.0037	0.00160	90.7
1.5% введенной проволоки	10.98	0.248	0.0022	0.041	0.0024	0.0110	0.097	0.0007	0.0027	0.0038	0.0012	90.6
3.0% введенной проволоки	10.0	0.259	0.0023	0.041	0.0026	0.010	0.094	0.0006	0.0026	0.0037	0.0011	90.6
4.5% введенной проволоки	10.06	0.264	0.0030	0.040	0.0024	0.010	0.092	0.0006	0.0026	0.0035	0.00098	90.5
Проволока Ø 6.2 мм												
До введения проволоки	11.04	0.204	0.0008	0.036	0.0012	0.0099	0.114	0.0004	0.0024	0.0025	0.0033	88.6
1.5% введенной проволоки	10.96	0.222	0.0013	0.035	0.0014	0.0099	0.115	0.0004	0.0024	0.0028	0.0024	88.6
3.0% введенной проволоки	10.94	0.223	0.0014	0.035	0.0012	0.010	0.118	0.0004	0.0024	0.0030	0.0023	88.7
4.5% введенной проволоки	10.92	0.226	0.0016	0.034	0.0010	0.0097	0.118	0.0003	0.0024	0.0028	0.0022	88.7

Из сопоставления механических свойств полученных опытных образцов следует, что заметный прирост прочностных и пластических характеристик отливок наблюдается с введением в расплав в качестве модификатора проволоки Ø4.2 мм в количестве 3.0-4.5%. Введение проволоки в количестве 1.5% приводит к незначительным изменениям механических свойств исследуемых образцов. Это же касается и использования проволоки Ø6.2 мм в любом количестве.

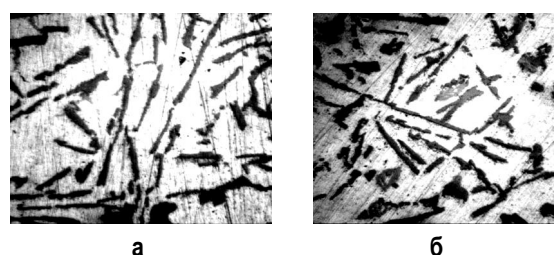
Таблица 4

Механические свойства опытных образцов

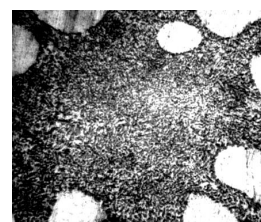
Механические свойства проб	До введения проволоки	После введения 1.5% проволоки	После введения 3.0% проволоки	После введения 4.5% проволоки
Проволока Ø 4.2 мм				
Предел прочности σ_b , МПа	172.6	213.6	217.3	237.1
Относительное удлинение δ , %	3.67	5.25	5.0	7.33
Проволока Ø 4.95 мм				
Предел прочности σ_b , МПа	171.3	184.9	190.1	197.8
Относительное удлинение δ , %	4.0	4.0	5.0	7.17
Проволока Ø 6.2 мм				
Предел прочности σ_b , МПа	171.6	176.4	175.2	174.6
Относительное удлинение δ , %	3.5	3.92	3.93	3.93

Подтверждением отмеченных закономерностей изменения свойств образцов послужили результаты изучения их микроструктуры. Недостаточное количество (1.5%) введенной в расплав проволоки не позво-

ляет достичь требуемой степени модифицирования структуры. При этом наблюдается грубоигольчатое строение эвтектики (рис. 5).

Рис. 5. Исходная микроструктура сплава АК12 (а) и с введением 1.5% проволоки (б), $\times 1000$

Введение 3.0-4.5% проволоки обеспечивает получение тонкодисперсного строения алюминий-кремниевой эвтектики (рис. 6).

Рис. 6. Микроструктура сплава АК12 при введении 3.0-4.5% проволоки из стружковых отходов этого же сплава, $\times 1000$

При этом уменьшение диаметра вводимой проволоки с 6.2 до 4.2 мм приводит к повышению плотности частиц кремния на единице площади (рис. 7), что можно связать с измельчением частиц кремния в алюминиевой матрице за счет увеличения степени деформации при волочении. Это позволяет при погружении проволоки в расплав обеспечить более высокую степень

термического переохлаждения расплава, что, в свою очередь, приводит к увеличению количества упорядоченных группировок-кластеров, являющихся зародышами эвтектических колоний при кристаллизации.

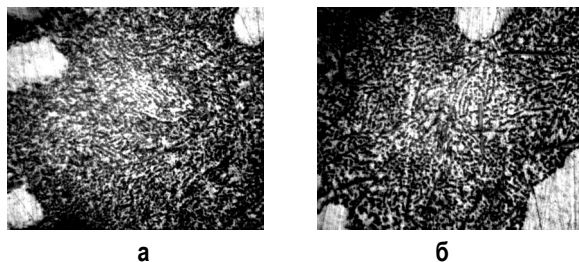


Рис. 7. Микроструктура силумина после введения проволоки $\varnothing 4.2$ мм (а) и $\varnothing 6.2$ мм (б) из стружковых отходов сплава АК12, $\times 1000$

Обобщая все вышеизложенное, можно сделать вывод о том, что введение в расплав проволоки, полученной из стружковых отходов сплава АК12, приводит к измельчению включений кремния в эвтектике отливок из того же сплава. При этом максимальный модифицирующий эффект достигается при введении ее в расплав в количестве не менее 3%. При меньшем ее содержании ($\sim 1.5\%$) не обеспечивается эффект модифицирования эвтектики. В заключение необходимо также отметить, что все представленные в работе материалы получены с использованием стружки, образующейся при механической обработке отливок из сплава АК12, модифицированных стронцием. Поскольку стронций способствует разветвлению бикри-

сталльных эвтектических колоний, его значение не исключается в суммарном эффекте модифицирования расплава стружковой проволокой. При этом роль высокодисперсных кремниевых частиц, вводимых в расплав перед разливкой, связана с увеличением числа зародышей образующихся эвтектических колоний. Суммарный эффект модифицирования и обеспечивает дополнительный прирост механических свойств кристаллизующегося сплава.

Список литературы

1. Строганов Г.Б., Ротенберг В.А., Гермаш Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием. М.: Metallurgy, 1977. 272 с.
2. Пат. 2257419 РФ. Способ получения модифицирующих материалов для алюминия и его сплавов / Климов А.П., Биронт В.С., Загиров Н.Н. и др. Оpubл. 27.07.05. Бюл. №21.
3. Влияние структуры лигатурных материалов на модифицирующий эффект при литье слитков алюминиевых сплавов / А.П. Климов и др. // Технология легких сплавов. 2001. №2. С. 14-19.
4. Технологическая схема получения лигатурного прутка из стружки силумина, исключаящая ее переплав / Загиров Н.Н., Аникина В.И., Усынина Г.П., Юриков А.С., Иванов Е.В. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2011. №1. С. 34-38.

Bibliography

1. Stroganov G.B., Rotenberg V.A., Gershman G.B. Aluminum alloys with silicon. M.: Metallurgy, 1977. 272 p.
2. Patent 2257419 RF, MPK B 22 C 1/03. Method of making modifying materials for aluminum and its alloys / Klimko A.P., Biron V.S., Zagirov N.N., etc.
3. Inoculation effect of alloying material structure in casting ingots of aluminum alloys / A.P. Klimko, etc. // Technology of Light Alloys. 2001, № 2. P. 14-19.
4. Manufacturing scheme of grain refiner rod made of silumin chip, excluding its remelting. / Zagirov N.N., Anikina V.I., Usynina G.P., Yurikov A.S., Ivanov E.V. // Vestnik of MSTU named after G.I. Nosov. Magnitogorsk, 2011. №1. P. 34-38.