

УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОТВОДОМ — НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин

ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси»

г. Могилев, Беларусь

Наиболее распространенными сплавами на основе алюминия являются силумины. Они получили широкое распространение благодаря отличным литейным свойствам и относительной дешевизне. Сплавы алюминия с кремнием, легированные медью, никелем и другими упрочняющими элементами, применяются в качестве материала таких деталей, как поршень ДВС, головка блока цилиндров ДВС и др. Сегодня разработаны сплавы на основе алюминия, способные выдерживать высокие механические и триботехнические нагрузки. Их повышенная износостойкость достигается легированием дорогостоящими элементами, такими как олово, никель, марганец и т. д. [1]. Главным недостатком легированных силуминов является высокая стоимость, поэтому легирование целесообразно лишь для изготовления дорогих деталей ответственного назначения.

Самым распространенным модификатором доэвтектических и эвтектических силуминов является металлический натрий или его соединения, надежно обеспечивающие измельчение важнейшей структурной составляющей этих сплавов — алюминиево-кремневой эвтектики. Также широко используют дешевые, так называемые универсальные флюсы — смеси фтористых и хлористых солей натрия в разных соотношениях, которые обеспечивают одновременно рафинирование и модифицирование. Для диспергирования первичных кристаллов кремния в заэвтектических силуминах применяют в основном фосфорсодержащие лигатуры, а для измельчения эвтектических кристаллов кремния — натрийсодержащие флюсы. Известно, что эти модификаторы нейтрализуют друг друга. Кроме этого, повышается склонность металла к газонасыщению, а время живучести натрийсодержащих флюсов не превышает 25–30 мин [2]. Также в результате модифицирова-

ния выделяется большое количество высокотоксичных хлоридов и фторидов, которые являются неметаллическими включениями и значительно ухудшают качество получаемых отливок [3]. Все это создает большие трудности в получении отливок с модифицированной структурой из заэвтектического силумина.

В связи с этим в ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси» разработан способ получения относительно недорогих Al – Si литейных сплавов с высокодисперсной инвертированной структурой [4]. На рис. 1 приведена схема лития закалочным затвердеванием.

Термин «инвертированная структура» впервые был применен для анализа микроструктуры ванадиевых чугунов. При инверсии наблюдается равномерное распределение изолированных друг относительно друга твердых частиц Si в мягкой матрице Al, что соответствует выполнению правила Шарпи. Как следствие увеличиваются прочностные, пластические и антифрикционные свойства отливок [5–7]. Это имеет большое значение для литейных сплавов. Обычно в литом состоянии они имеют низкие механические характеристики вследствие того, что их структура имеет крупнокристаллическое (неинвертированное) дендритное строение с переплетенными между собой ветвями или лепестками. При инвертировании микроструктуры такой порядок и строение нарушаются, благодаря чему механические и антифрикционные свойства сплава улучшаются. Таким образом, процесс инверсии литой структуры заключается в разрушении или изменении морфологии хрупкого дендритного скелета с целью его раздробления на более мелкие изолированные друг от друга эвтектические зоны (зерна), кристаллы и их фазовые фрагменты.

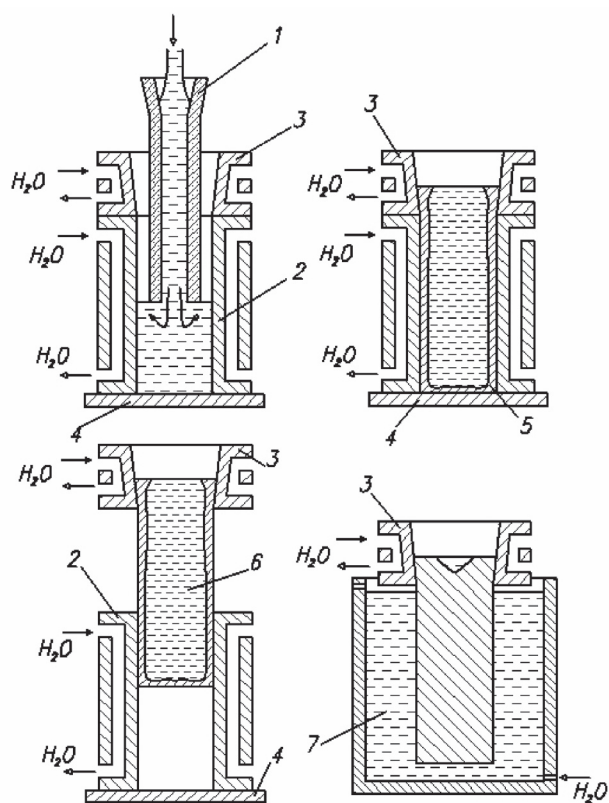


Рис. 1. Схема получения отливок методом литья закалочным затвердеванием:
a — заполнение литейной формы;
б — формирование корочки; *в* — извлечение отливки; *г* — кристаллизация отливки в закалочной ванне

В работе [5] показано, что отливки с такой микроструктурой обладают повышенными механическими и триботехническими характеристиками. Основными параметрами, влияющими на фрикционную износостойкость силуминов с высокодисперсной микроструктурой, являются: дисперсность их микроструктуры, химический состав сплава, а также режим термообработки полученных отливок.

Дисперсность микроструктуры заготовок, получаемых при литье закалочным затвердеванием, определяется в основном охлаждающей способностью устройства затоплено-струйного вторичного охлаждения (УЗСВО) [8]. Основными конструктивными параметрами, влияющими на охлаждающую способность этого устройства, являются ширина кольцевой щели и расположение отверстий в экране. Было спроектировано и изготовлено экспериментальное устройство вторичного охлаждения заготовок диаметром 75 мм. Схема устройства представлены на рис. 2.

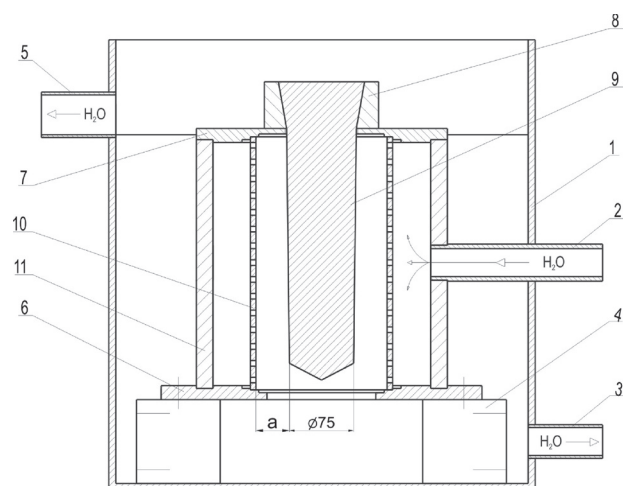


Рис. 2. Схема экспериментального устройства затоплено-струйного вторичного охлаждения:
 1 — бак; 2 — подводящий патрубок;
 3 — отводящий патрубок; 4 — опорный стол;
 5 — сливной патрубок; 6 — нижний фланец;
 7 — верхний фланец; 8 — захват; 9 — отливка;
 10 — экран; 11 — корпус; *a* — ширина кольцевой щели

Охлаждение отливки 9 осуществляется следующим образом. Охладитель из подводящего патрубка 2 тангенциально поступает в коллектор между корпусом 11 и экраном 10, далее равномерно продавливается в виде затопленных струй через отверстия в экране. Отливка охлаждается затопленными струями, исходящими из отверстий диаметром 3 мм, что существенно интенсифицирует процесс затвердевания. Данное устройство с помощью сменных экранов 10 позволяет варьировать ширину кольцевой щели в пределах 5–20 мм и расстояние между отверстиями в экране.

Критерием охлаждающей способности УЗСВО является коэффициент теплоотдачи от отливки к охладителю. Для определения распределения температуры в заготовке была изготовлена из алюминия марки А7 экспериментальная отливка диаметром 75 мм и высотой 160 мм. В средней части отливки расположили 4 термоэлектрических преобразователя (ТП) ТХА-1199/51Н, изготовленных на НПООО «Энергоприбор». Диаметр неизолированного рабочего спая ТП 0,6 мм, диаметр защитного корпуса 1,5 мм. Схема расположения ТП представлена на рис. 3.

Отливку нагревали в печи сопротивления марки «Snol-1300» до температуры 580 °С и помещали в УЗСВО. Входное давление и расход в устройстве вторичного охлаждения составляли соответственно 0,2 МПа и 50 м³/ч. Показания ТП фиксировали блоком регистрирования температуры «LG».

Эксперименты проводили при ширине кольцевой щели 5, 10, 15 и 20 мм и расстоянии между отверстиями в экране 10 и 20 мм. Распределение температуры в отливке при ширине кольцевой щели 10 мм и расстоянии между отверстиями в экране 20 мм в различные моменты времени охлаждения представлено на рис. 4. Из него следует, что распределение в экспериментальной отливке из алюминия при охлаждении в УЗСВО можно принять линейным. Эксперименты, проведенные при различных ширине кольцевой щели и расстоянии между отверстиями в экране, показали аналогичное линейное распределение в отливке. С учетом выше сказанного допущения расчет коэффициента теплоотдачи между отливкой и охлаждающей жидкостью производили по формуле

$$\alpha = -\lambda \frac{T_1(t) - T_2(t)}{l_2} \cdot \frac{1}{T_1(t) - \frac{l_1}{l_2}(T_2(t) - T_1(t)) - T_{\text{ж}}}$$

где λ — теплопроводность алюминия; $T_1(t)$ и $T_2(t)$ — показания ТП в точках 1 и 2 (рис. 3); $T_{\text{ж}}$ — температура охлаждающей жидкости. Принимаем $\lambda = 213 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ [9].

Результаты расчетов коэффициентов теплоотдачи при различных ширине кольцевой щели и расстоянии между отверстиями в экране представлены на рис. 5.

Из него следует, что наибольший коэффициент теплоотдачи между отливкой и охлаждающей жидкостью достигается при ширине кольцевой щели 10 мм и расстоянии между отверстиями в экране 20 мм.

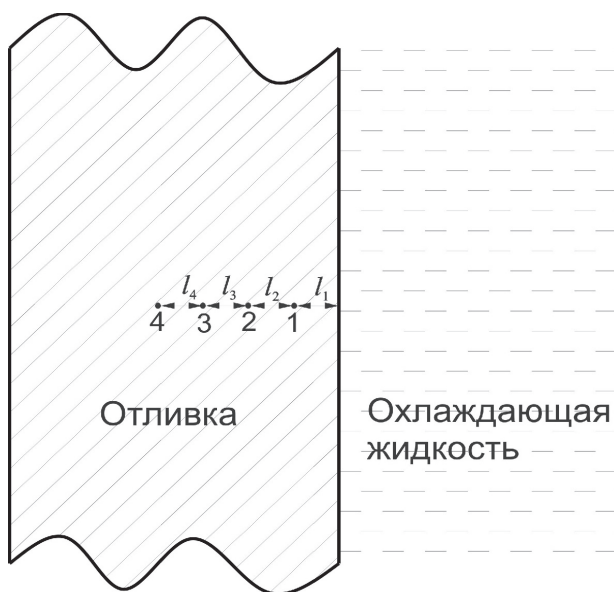


Рис. 3. Схема расположения ТП в отливке $l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = 5 \text{ мм}$

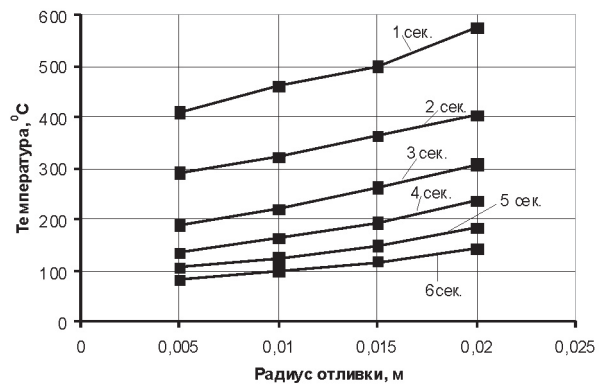


Рис. 4. Распределение температуры в отливке при ширине кольцевой щели 10 мм и расстоянии между отверстиями в экране 20 мм в различные моменты времени охлаждения

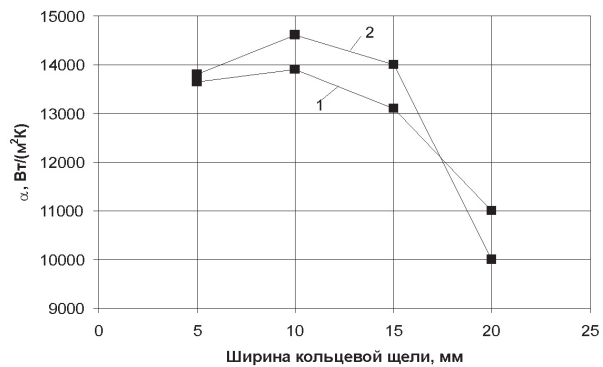


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплоотдачи от ширины кольцевой щели УЗСВО: 1 — расстояние между отверстиями в экране 10 мм; 2 — 20 мм

Таким образом, максимальная охлаждающая способность устройства затоплено-струйного вторичного охлаждения достигается при ширине кольцевой щели 10 мм и расстоянии между отверстиями в экране 20 мм. Микроструктура заготовок, полученных при этих параметрах УЗСВО, приведена на рис. 6.

Для проведения исследований заготовки из силуминов с высокодисперсной микроструктурой получали на опытной установке литья закалочным затвердеванием. Расплавы готовили в электропечи сопротивления марки «Snol-1300» в шамото-графитовом тигле. В качестве шихтовых материалов использовали чушковый сплав АК12, лигатуры Al + 40 % Si и Al + 33 % Cu. При температуре 800 °С металл заливали в струйный кристаллизатор и получали отливки диаметром 50 мм и высотой 160 мм из сплавов АК12, АК15 и АК18.

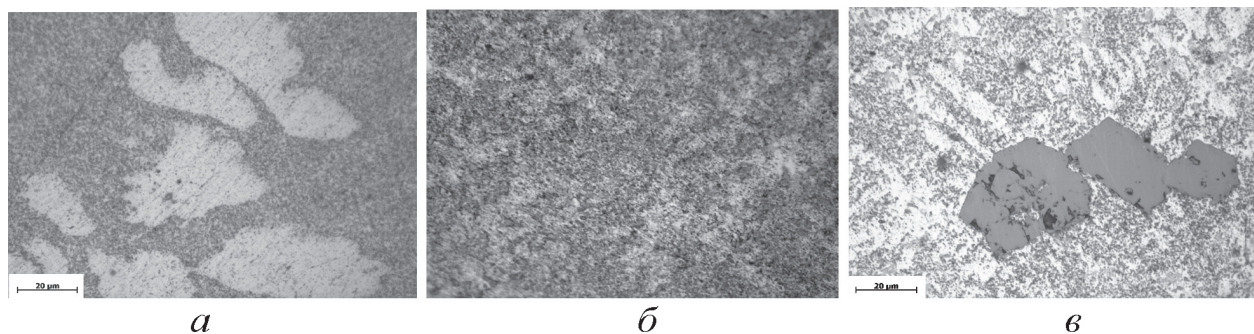


Рис. 6. Микроструктура отливок из силумина: а — АК12; б — АК15; в — АК18

Для исследования микроструктуры отливок из них вырезали поперечные шлифы. После их шлифовки, полировки и химического травления водным раствором кислот 2 % HCl + 3 % HNO₃ + +1 % HF микроструктуру анализировали с помощью аппаратно-программного комплекса на базе микроскопа «Carl Zeiss Axiotech vario». Твердость образцов измеряли на твердомере ТШ-2М.

Отливки из сплава АК12 состояли из первичных кристаллов α-фазы средней толщиной 17 мкм и кристаллов эвтектического кремния глобулярной формы средней дисперсностью 1,2 мкм (рис. 6, а). Размер равномерно распределенных глобулярных кристаллов эвтектического кремния в образцах сплава АК15 в среднем составлял 1,2 мкм. Кристаллы первичного кремния со средним размером 30 мкм так же были равномерно распределены, при 100-кратном увеличении в поле зрения окуляра находились 1–2 включения (рис. 6, б). Микроструктура опытных заготовок из сплава АК18 была представлена равномерно распределенными кристаллами глобулярного эвтектического кремния со средним размером 1,6 мкм и кристаллами первичного кремния со средним размером 35 мкм (рис. 6, в).

Исследования на фрикционную износостойкость образцов из антифрикционных силуминов проводились на машине трения СМЦ-2 в условиях сухого трения по схеме вал – втулка с нагрузкой 0,6 МПа и скоростью скольжения образца относительно стального шлифованного вала (сталь 45) твердостью 58 HRC 0,38 м/с. Продолжительность испытания каждого образца составляла 3 ч. Износ контртела оценивался с помощью микрометра с ценой деления 0,01 мм. Расчет скорости износа образцов проводили по следующей формуле:

$$V = \frac{\Delta M}{S \cdot \rho \cdot \tau},$$

где ΔM — разность массы образца до и после износа; S — площадь рабочей поверхности образца; ρ — плотность образца; τ — время износа.

Взвешивание образцов проводили на электронных весах марки «Stratorius BP1S» с точностью до 0,0001 г.

Для определения режима испытаний силуминовых образцов на машине трения был проведен следующий эксперимент. Изготовили образец для испытания на фрикционную износостойкость из сплава АК12 с припаянным термоэлектрическим преобразователем ТХА-1199/51Н, диаметр неизолированного рабочего спая ТП — 0,6 мм, диаметр защитного корпуса — 1,5 мм.

С помощью механизма нагружения выбиралась нагрузка, при которой температура образца не превышала 100 °С. Было установлено, что при нагрузке 0,6 МПа и скорости скольжения образца относительно стального шлифованного 0,38 м/с образец нагревается не выше 98 градусов. Все последующие эксперименты проводились при этих условиях.

Исследования показали, что средняя скорость износа образцов из сплава АК12 составила 0,1376 мм/ч, АК15 — 0,1235 мм/ч, АК18 — 0,1050 мм/ч. После испытаний сплавов АК12 и АК15 износ контртела не наблюдался. Образцы из сплава АК18 изнашивают контртело со средней скоростью 0,006 мм/ч.

Установлено, что повышение концентрации кремния в составе силумина увеличивает его износостойкость. Наличие в микроструктуре отливок кристаллов первичного кремния отрицательно сказывается на процессе прирабатываемости. Поэтому наиболее приемлемым содержанием кремния в износостойком силумине является 15%.

Для определения влияния структурной дисперсности заготовок из сплава АК15 на их фрикционную износостойкость методом литья в струйный кристаллизатор были изготовлены

отливки диаметром 50 мм и высотой 160 мм. Микроструктура этих отливок состояла из равномерно распределенных в алюминиевой матрице кристаллов эвтектического кремния глобулярной формы со средним диаметром 1,2 мкм. Для получения кристаллов эвтектического кремния различной дисперсности заготовки подвергались гомогенизации при температуре 520 °С и выдержке 1–10 ч. В результате были получены образцы из силумина АК15 со средними диаметрами глобулярного эвтектического кремния 2–7 мкм (рис. 7).

Каждый из полученных образцов проходил испытания на фрикционную износостойкость в течение 3 ч. Результаты приведены в табл. 1.

Из данных табл. 1 следует, что увеличение диаметра глобулярных кристаллов эвтектического кремния в сплаве АК15 с 1,2 мкм до 3,2–3,9 мкм позволяет повысить фрикционную износостойкость образцов на 9–14 %, а их дальнейшее укрупнение не приводит к значительному повышению износостойкости образцов. Наиболее приемле-

мым размером включений шаровидного кремния для антифрикционного эвтектического силумина является 3–4 мкм, т. к. такая дисперсность кристаллов эвтектики позволяет существенно повысить износостойкость заготовок и не требует длительной термообработки.

Известно, что легирование силуминов медью позволяет повысить механические свойства заготовок. Поэтому для исследования влияния содержания меди на фрикционную износостойкость эвтектического антифрикционного силумина литьем в струйный кристаллизатор были изготовлены отливки диаметром 50 мм и высотой 160 мм из сплава АК15 с содержанием меди 1, 2, 3 и 4 %. Их термообработку проводили по режиму T5: нагрев до температуры 520 °С, выдержка в течение 4 ч, закалка в воде и последующее искусственное старение в течение 6 ч при температуре 175 °С. Время испытания образцов на фрикционную износостойкость составляло 3 ч. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

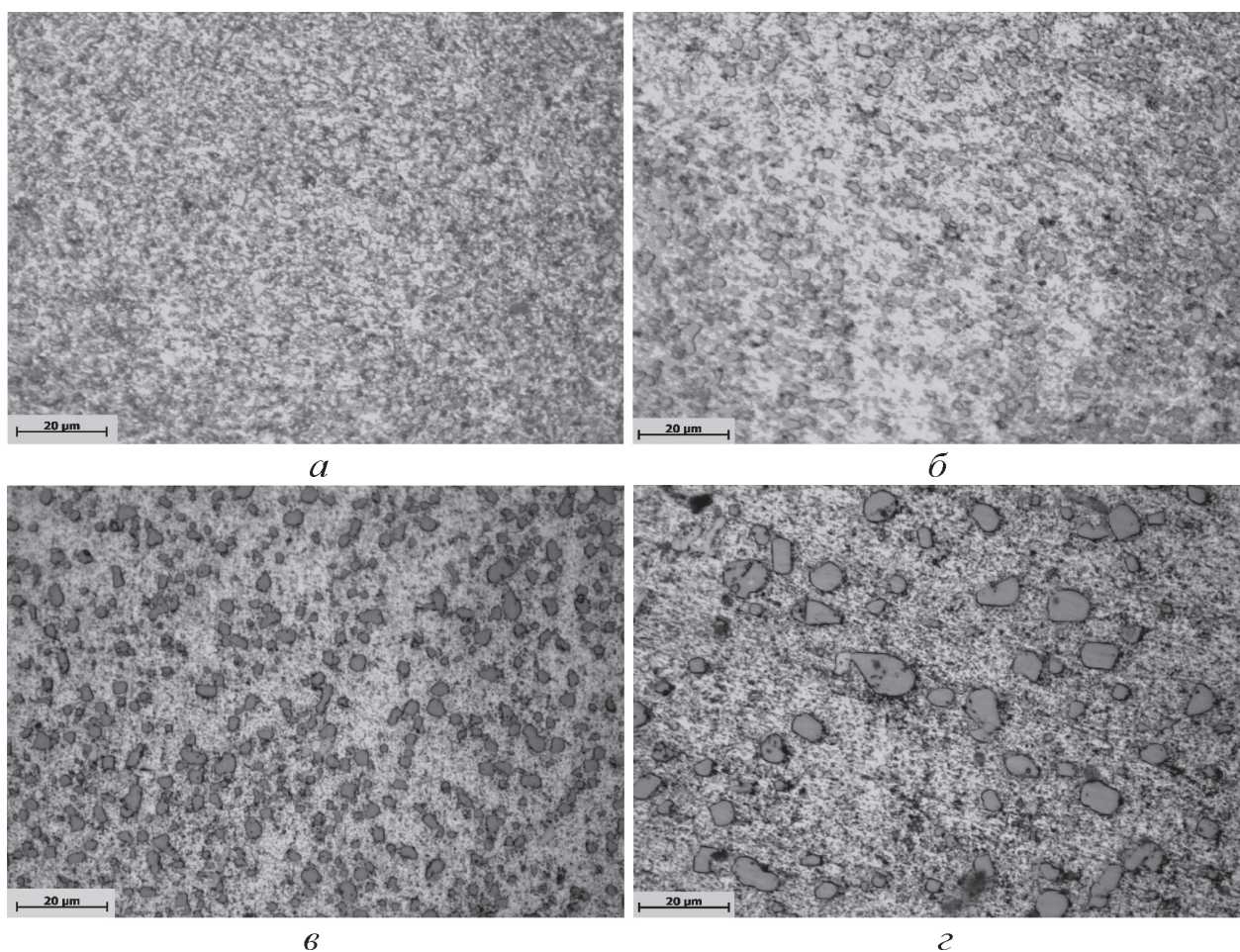


Рис. 7. Микроструктура гомогенизированных образцов из сплава АК15:
 а — 520 °С, 1 ч; б — 520 °С, 4 ч; в — 520 °С, 6 ч; г — 520 °С, 10 ч

Табл. 1

Влияние дисперсности глобулярных кристаллов кремния на фрикционную износостойкость сплава АК15

№ образца	Температура гомогенизации, °С	Время гомогенизации, ч	Дисперсность кристаллов эвтектического кремния, мкм	Твердость, НВ	Средняя скорость износа, мм/ч
0	–	–	1,2	72,6	0,1235
1	520	1	2,2	72,6	0,1172
2	520	3	3,2	72,6	0,1126
3	520	5	3,9	72,6	0,1065
4	520	10	7,0	72,6	0,1029

Табл. 2

Влияние содержания меди на твердость и фрикционную износостойкость сплава АК15

№ образца	Материал образца	Режим термообработки	Средняя дисперсность кристаллов эвтектического кремния, мкм	Твердость, НВ	Средняя скорость износа, мм/ч
5	АК15	гомогенизация 520 °С, 4 ч	3,7	72,6	0,1134
6	АК15М1	Т5	3,5	77,9	0,1132
7	АК15М2	Т5	3,6	98,2	0,0991
8	АК15М3	Т5	3,8	113,8	0,0835
9	АК15М4	Т5	3,7	129,0	0,0811

Из табл. 2. следует, что наиболее рациональным содержанием меди в антифрикционном силумине АК15 является 3–4 %, т. к. обеспечивает повышение твердости заготовок в среднем в 1,7 раза и износостойкости более чем на 20 %.

Полученные заготовки проходили цикл сравнительных триботехнических испытаний в Санкт-Петербургском институте машиностроения на кафедре триботехники. В условиях сухого трения образцы исследовались при нормальном напряжении 12,8 Н и вращении со скоростью 620 об./мин, а в условиях смазки И20А — при нормальном напряжении 200 Н и вращении со скоростью 300 об./мин. Материал контртела — закаленная сталь 45. В качестве образцов сравнения были изготовлены аналогичные образцы из бронзы БрОЦС5-5-5.

В результате проведенных испытаний установлено, что при сухом трении коэффициент трения образцов сплава АК15М3 в 1,65 раза, а линейный износ — в 7 раз ниже, чем аналогичных из БрОЦС5-5-5 (рис. 8).

При трении в условиях смазки коэффициент трения образцов из силумина АК15М3 в 1,35 раза ниже, чем аналогичных из бронзы, при этом линейный износ в 23 раза ниже (рис. 9).

В настоящее время заготовки из алюминиево-кремниевого сплава внедрены в производство и поставляются на предприятия Республики Беларусь: ОАО «Завод «Оптик» (г. Лида), ОАО «Белшина» (г. Бобруйск), РУПП «Станкозавод «Красный Борец» (г. Орша), ОАО «Бобруйсксельмаш» (г. Бобруйск), ПО «Гомсельмаш» (г. Гомель). Стоимость заготовок из антифрикционного алюминиево-кремниевого сплава в среднем в 2 раза ниже, чем аналогичных из бронз.

Таким образом, разработано устройство затоплено-струйного охлаждения, которое обеспечивает высокую скорость затвердевания отливкам из силуминов и позволяет получать заготовки с дисперсностью кристаллов эвтектического кремния 1,2 мкм. Определены рациональный состав и режим термообработки эвтектического антифрикционного силумина, которые обеспечивают ему максимальную износостойкость при фрикционном трении.

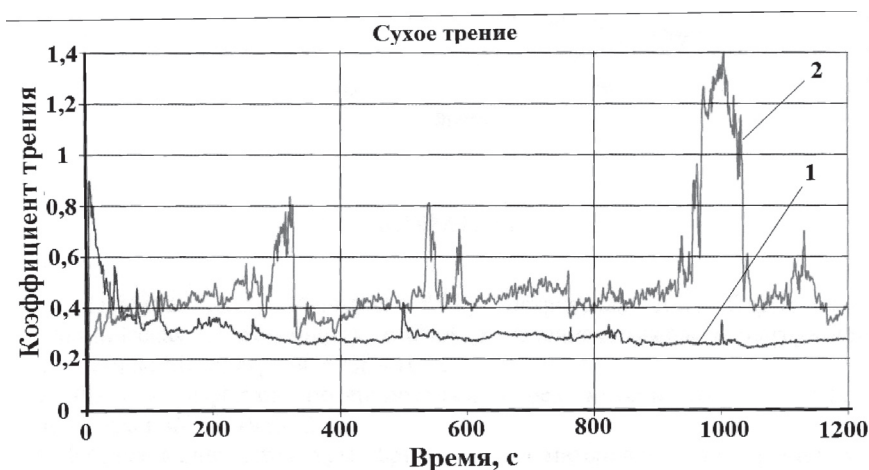


Рис. 8. График изменения коэффициента трения от времени при сухом трении:
1 — силумин АК15М3; 2 — бронза БрОЦС5-5-5

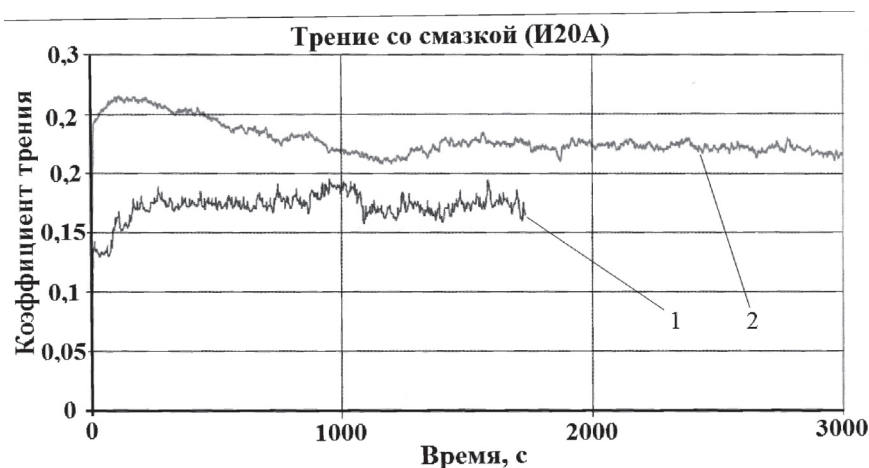


Рис. 9. График изменения коэффициента трения от времени при трении в условиях смазки И20А:
1 — силумин АК15М3; 2 — бронза БрОЦС5-5-5

Литература

1. Строгонов, Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием / Г.Б. Строгонов, В.А. Ротенберг, Г.Б. Гершман. — М.: Металлургия, 1977. — 267 с.
2. Альтман, М.Б. Повышение свойств стандартных литейных алюминиевых сплавов / М.Б. Альтман, Н.П. Стромская. — М.: Металлургия, 1984. — 128 с.
3. Марукович, Е.И. Повышение эффективности модифицирования / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Литье и металлургия. — № 2. — 2006. — С. 151–153.
4. Марукович, Е.И. Модифицирование сплавов / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко. — Минск: Беларус. Навука, 2009. — 192 с.
5. Марукович, Е.И. Получение литейных сплавов с инвертированной структурой / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Литье и металлургия. — № 4. — 2001. — С. 36–39.
6. Марукович, Е.И. Особенности структурообразования при литье заэвтектического силумина с инвертированной структурой / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Литье и металлургия. — № 4. — 2001. — С. 40–42.
7. Марукович, Е.И. Литье заэвтектических силуминов с инвертированной структурой / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко // Литье и металлургия. — № 4. — 2000. — С. 54.
8. Стеценко, В.Ю. Расчет затвердевания отливки АК12 в устройстве затоплено-струйного охлаждения / В.Ю. Стеценко, А.И. Ривкин, Р.В. Коновалов // Литье и металлургия. — 2008. — № 3. — С. 218–219.
9. Баландин, Г.Ф. Основы теории формирования отливки / Г.Ф. Баландин. — Ч. I. — М.: Машиностроение, 1979. — 328 с.