



*The control of hardness changing, as well as durability tests of experimental alloys by means of time determination before samples destruction are carried out*

К. Н. ЛОЗА, ОАО «МОТОР СИЧ», А. А. МИТЯЕВ,  
И. П. ВОЛЧОК, Запорожский национальный технический университет

УДК 669.714.1

## ПОВЫШЕНИЕ ЖАРОПРОЧНОСТИ ПОРШНЕВОГО СПЛАВА АЛ25

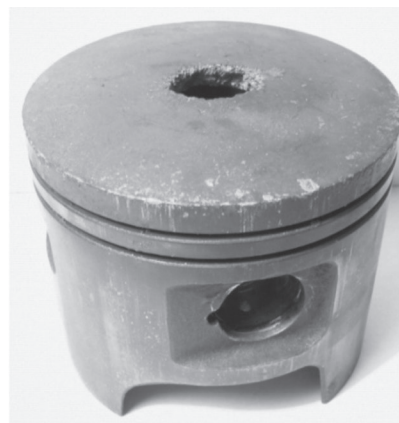
Поршень является ответственной деталью двигателя внутреннего сгорания. Повреждение или выход поршня из строя приводит к немедленному прекращению эксплуатации двигателя и необходимости проведения трудоемкого и дорогостоящего капитального ремонта. Жаропрочность наряду с жаростойкостью является одной из важнейших эксплуатационных характеристик, определяющих ресурс работы изделий из поршневых сплавов. Недостаточно высокие показатели жаропрочности и коррозионной стойкости служат причинами прогара поршней (рис. 1).

Повысить жаропрочность алюминиевых поршневых сплавов удается путем легирования элементами, образующими тугоплавкие соединения, однако этот метод не всегда оказывается приемлемым с экономической, технологической или экологической точек зрения. В то же время накопление больших количеств возврата (бракованные детали, литники, стружка) поршневого сплава АЛ25 требует разработки эффективных способов его переработки. Технологии получения отливок, ориентированные на первичные

сплавы, в данном случае не всегда эффективны в связи с повышенной загрязненностью отходов различными неметаллическими материалами и железом. Примесные элементы и, в первую очередь, железо образуют комплексные интерметаллидные фазы пластинчатой формы и больших размеров, которые отрицательно влияют на уровень механических свойств. Кроме того, они являются достаточно тугоплавкими, что положительно сказывается на жаропрочности, необходимой для поршневых сплавов. Обладая низким коэффициентом диффузии в алюминии, железо и тугоплавкие фазы на его основе способны значительно повысить жаропрочность данных сплавов и выступить как полезный легирующий элемент. Исходя из этого, с целью повышения уровня механических свойств вторичных сплавов, при сохранении их повышенной жаропрочности, следует изменить форму интерметаллидных включений с пластинчатой на компактную и уменьшить их размеры, что будет соответствовать принципам, заложенным в требованиях к микроструктуре поршневых сплавов.



а



б

Рис. 1. Прогар поршня: а – разрушение периферийной зоны; б – разрушение центральной зоны

В данной работе проводили исследования свойств поршней бензопилы «Мотор Сич - 270» и мотор-блока «Мотор Сич МБ - 4,05». Заводская технология приготовления сплава АЛ25 (АК12М2МгН) заключалась в плавлении шихтовых материалов в графитовом тигле в газовой печи с последующим модифицированием расплава фторцирконатом калия  $K_2ZrF_6$  при температуре 720 °С. Модификатор в количестве 0,5–1,0% от массы шихты засыпали на зеркало расплава с последующим его замешиванием в течение 2–3 мин. Затем проводили отстаивание расплава, удаление шлака и фильтрацию сплава через стеклосетку ССФ2-ССФ3 при переливе в раздаточную печь. Поршни, полученные литьем в кокиль из подготовленного таким образом сплава АЛ25, имели заданный уровень механических свойств и достаточно равномерно модифицированную структуру по всему сечению отливки (рис. 2, а).

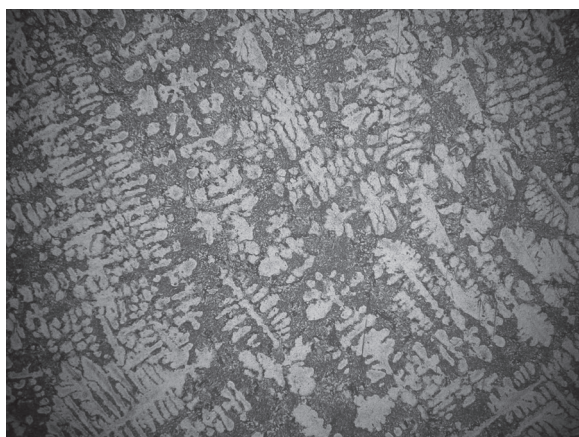
Основной зарубежный поставщик поршней на мировой рынок – фирма «Mahle» (Германия), которая разработала шкалу допустимых микроструктур для сплавов, являющихся аналогами АЛ25 (АК12М2МгН) и АЛ30 (АК12ММгН) по ДСТУ 2839–94 (ГОСТ 1583–93). Идеальной с точки зрения данной шкалы является зернистая, размодифицированная структура с компактными ячейками эвтектического кремния на фоне дендритного  $\alpha$ -твердого раствора, при этом длина кристаллов первичного кремния не должна превышать 100 мкм.

Структура сплава, полученного по заводской технологии, не является оптимальной согласно рекомендациям фирмы «Mahle». Это подтверждается тем, что в процессе работы поршня, под воздействием циклического действия температуры и давления, структура сплава претерпевает изменения (рис. 2, б). Наблюдается снижение степени

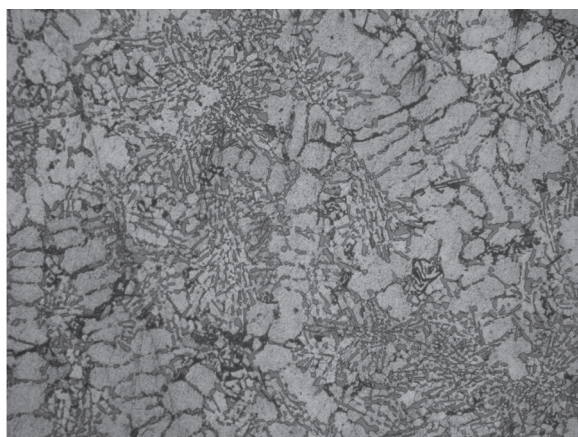
модифицирования по всему сечению поршня, что свидетельствует о недостаточной термической стабильности структуры сплава в его первоначальном состоянии (рис. 2, а, б).

В связи с этим возникала необходимость стабилизации структуры поршня и исключения ее изменений под воздействием рабочих температур. С учетом наследственности алюминиевых сплавов была предпринята попытка получения оптимальной структуры при переплаве 100%-ного возврата поршневых материалов из сплава АЛ25. Идея заключалась в том, что при переплаве модифицированного возврата и небольшого времени его нахождения в жидком состоянии эффект модифицирования не исчезает полностью, а ослабевает, позволяя получать так называемую размодифицированную по эвтектическому кремнию структуру, рекомендуемую для поршней фирмой «Mahle». В то же время присутствующие во вторичном сплаве интерметаллидные включения и  $\alpha$ -твердый раствор кремния в алюминии необходимо было модифицировать с целью получения фаз компактной формы и небольших размеров. Для решения этих задач был разработан модифицирующий комплекс (МК), основное действие которого направлено на изменение формы, размеров и характера распределения интерметаллидных фаз, эвтектического кремния и  $\alpha$ -твердого раствора кремния в алюминии [1]. Кроме того, использование комплекса обеспечивало эффективную рафинирующую обработку расплава от неметаллических включений и растворенных газов.

Была разработана технология рециклинга 100%-ного возврата сплава АЛ25 и проведены экспериментальные плавки с возрастающей присадкой модифицирующего комплекса [1], что в дальнейшем позволило оптимизировать его количество.



а



б

Рис. 2. Микроструктура поршня из сплава АЛ25, полученного по заводской технологии: а – до эксплуатации; б – после эксплуатации в течение 100 ч.  $\times 100$

Свойства сплава АЛ25 при комнатной и повышенных температурах, полученного по разным технологическим вариантам

Характеристика материала и дополнительной обработки	Механические свойства при 20 °С		Твердость НВ после выдержки при 300 °С в течение 100 ч, МПа	Время до разрушения при P=50 МПа и T=300 °С, ч	Примечание	
	σв, МПа	НВ, МПа				
Заводская технология	Первичный сплав АЛ25 без модифицирования	210,7	950	570	116 <sup>00</sup> *	Данные карты исследований № 110ц центральной металлургической лаборатории «Мотор Сич» от 02.07.2007 г. Данные журнала «Вестник двигателестроения» № 1, 2008. С. 75–79. * Приведены лучшие значения показателя.
	Модифицирование 0,05 % SiC	210,6	1040	728	104 <sup>00</sup> *	
	Модифицирование 0,2 % SiC	246,0	1100	770	121 <sup>00</sup> *	
	Модифицирование 0,05 % SiC + 0,1 % K <sub>2</sub> ZrF <sub>6</sub>	248,0	1040	728	172 <sup>00</sup> *	
	Модифицирование 1,2 % SiC + 2,4 % K <sub>2</sub> ZrF <sub>6</sub>	244,0	1080	756	124 <sup>00</sup> *	
Экспериментальная технология	Первичный сплав АЛ25 без модифицирования	294,3	1170	-	61 <sup>00</sup>	Данные карты исследований № 203ц от 17.12.2008 г. Протокол № 200 от 09.10.2008 г. лаборатории механических испытаний. Протокол № 478 от 20.10.2008 г. лаборатории жаропрочных испытаний.
	Модифицирование 0,05 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	272,0	1340	-	50 <sup>00</sup>	
	Модифицирование 0,5 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	307,7	1290	-	61 <sup>00</sup>	
	Модифицирование 0,05 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 0,2 % K <sub>2</sub> ZrF <sub>6</sub>	285,7	1290	-	65 <sup>30</sup>	
	Модифицирование 0,5 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 1,0 % K <sub>2</sub> ZrF <sub>6</sub>	287,3	1340	-	36 <sup>00</sup>	
	Переплав 100%-ного возврата АЛ25 без модифицирования (вторичный АЛ25)	259	1085	770	138 <sup>45</sup> **	
Сплав АЛ25 по ДСТУ 2839–94 (ГОСТ 1583–93)	Модифицирование 0,05 % МК <sup>1</sup>	251	1070	760	191 <sup>20</sup> **	
	Модифицирование 0,10 % МК	257	1370	770	220 <sup>45</sup> **	
	Модифицирование 0,15 % МК	258	1280	770	411 <sup>45</sup> **	
	Модифицирование 0,20 % МК	269	1120	770	245 <sup>00</sup> **	
	Модифицирование 0,25 % МК	249	1070	770	235 <sup>00</sup> **	
	≥ 190	≥ 900	-	-		

Примечание: <sup>1</sup> МК – модифицирующий комплекс [1].

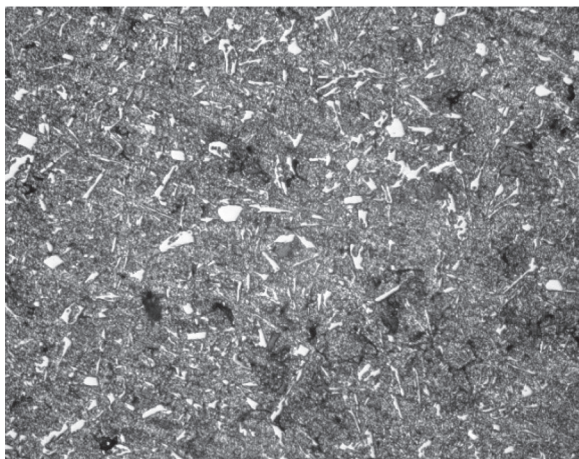


Согласно [2], твердость, определенная при 20 °С после выдержки при 300 °С в течение 100 ч, может служить надежным показателем жаропрочности алюминиевых сплавов, поэтому ее измерение должно стать первоочередным фактором контроля. В связи с этим в данной работе были проведены контроль изменения твердости, а также испытания экспериментальных сплавов на длительную прочность по ГОСТ 10145–81 путем определения времени до разрушения образцов при температуре испытаний  $T_{исп.} = 300$  °С и нагрузке на образец  $P = 50$  МПа.

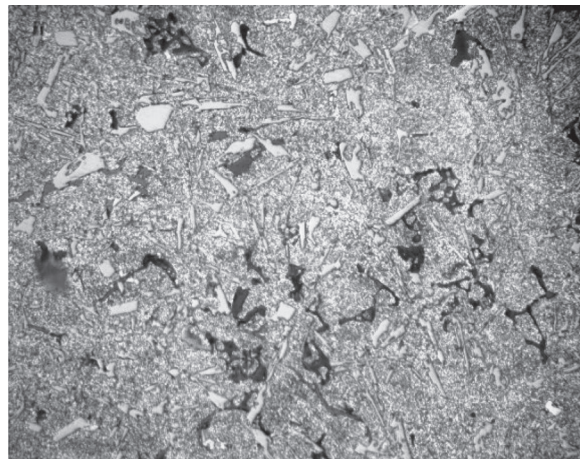
Было проведено сравнение результатов испытаний вторичных экспериментальных сплавов с результатами сплавов, полученных на ОАО «Мотор Сич» по заводской технологии (см. таблицу). Из таблицы видно, что экспериментальная технология и разработанный модифицирующий комплекс обеспечивают после рециклинга возврата полученные уровни механических свойств, соответствующие требованиям ДСТУ 2839–94 (ГОСТ 1583–93).

В то же время по характеристикам показателей жаропрочности экспериментальные сплавы имели явное преимущество в сравнении с заводскими. Так, время до разрушения экспериментального сплава, обработанного 0,15% МК, при температуре  $T = 300$  °С и нагрузке  $P = 50$  МПа в 2,4 раза превосходило лучший заводской сплав (см. таблицу).

С целью установления причин повышения длительной прочности экспериментальных сплавов были проведены металлографические и фрактографические исследования металла после высокотемпературных испытаний. Анализ микроструктур показал наличие соответствия структуры сплавов и их длительной прочности. Для сплава, который имел наибольшее время до разрушения (см. таблицу, технологический вариант № 3), характерна структура с равномерным распределением мелкодисперсных интерметаллидных фаз компактной формы, которые надежно блокируют границы зерен  $\alpha$ -твердого раствора кремния в алюминии, а их большое количество совместно

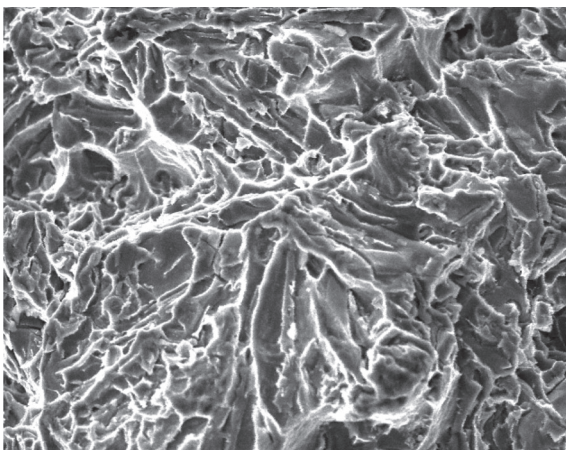


*a*

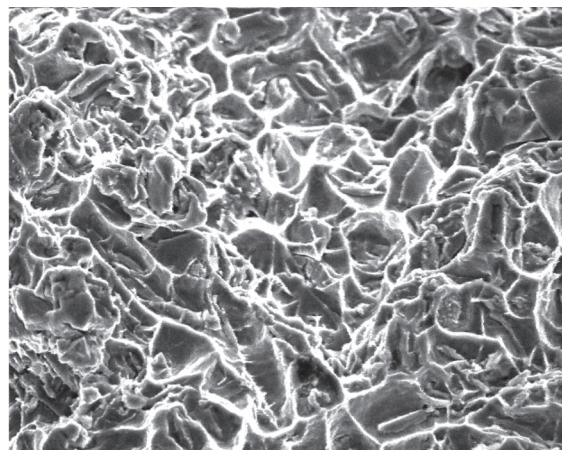


*б*

Рис. 3. Микроструктура экспериментального сплава АЛ25, обработанного 0,15 мас.% модифицирующего комплекса, после испытаний на длительную прочность: *a* –  $\times 200$ ; *б* –  $\times 500$ .



*a*



*б*

Рис. 4. Поверхность разрушения образцов из сплава АЛ25: *a* – без обработки модифицирующим комплексом; *б* – после обработки 0,15 мас.% модифицирующего комплекса.  $\times 500$

с эвтектическим кремнием и небольшие расстояния между собой являются надежными барьерами на пути движения дислокаций, что препятствует высокотемпературному разрушению (см. таблицу, рис. 3). Фрактограммы поверхности разрушения сплавов, обработанных разработанным модификатором, свидетельствуют о повышении энергоемкости разрушения с увеличением температуры испытаний, о чем свидетельствует наличие ямочного рельефа в сравнении со сплавом, необработанным модификатором (рис. 4).

В результате разработаны экспериментальные модифицирующий комплекс и технология реци-

клинга 100%-ного возврата сплава АЛ25, позволившие добиться за счет получения оптимальной структуры повышения жаропрочности вторичного сплава АЛ25 более чем в 2 раза по сравнению с лучшими заводскими сплавами. Оптимальная присадка модифицирующего комплекса составила 0,15 мас.%. Полученные результаты по твердости, определенной при 20 °С после выдержки при 300 °С в течение 100 ч, не подтвердили утверждение [2], что твердость является надежным показателем жаропрочности алюминиевых сплавов. Установлено, что определяющим фактором жаропрочности сплава АЛ25 служит структурно-фазовое состояние.

### Литература

1. Пат. 46094 Україна: МПК (2009) С22С1/00. Модифікувальний комплекс для алюмінієвих сплавів / К. М. Лоза, О. А. Міт'яєв, І. П. Волчок.

2 В а с е н н В. И. Об определении жаропрочности алюминиевых сплавов // Металлургия машиностроения. 2004. № 3. С. 38–40.