

**Повышение механических свойств поршневых сплавов
с повышенным содержанием железа**

Студенты гр. 10405220 Фармонова Г.Б., Рукина К.А.
Научные руководители Неменёнок Б.М., Румянцева Г.А.
Белорусский национальный технический университет
г. Минск

Проблема снижения потребления топлива, улучшения экологических параметров двигателей требует повышения надёжности и увеличения ресурса работы двигателей большегрузных автомобилей, тракторов, комбайнов. За последние 100 лет удельная мощность двигателей возросла в 7 раз, а для двигателей с турбонаддувом в 10 раз и это наращивание мощности продолжается. Форсирование режимов работы двигателей существенно повышает тепловые и динамические нагрузки, воздействующие на большинство деталей и агрегатов двигателя и в первую очередь на поршень.

К особенностям условий работы поршней следует отнести значительные нагрузки, меняющиеся в течение одного цикла по знаку и по направлению, контакт с высокотемпературными продуктами сгорания топлива, вызывающими разогрев днища поршня при определенных режимах работы до температуры 350 °С и более. Следует также учитывать, что на работоспособность поршня основное влияние оказывают напряжения, вызванные температурными градиентами по телу поршня, уменьшение которых за счет изменения конструкции поршня ограничено.

Анализ материалов, используемых в отечественном и зарубежном двигателестроении для изготовления поршней, показывает, что наиболее полно предъявляемым требованиям удовлетворяют сложнoleгированные силумины. Разные страны, фирмы и предприятия используют сплавы, незначительно различающиеся по концентрации отдельных легирующих компонентов (Si, Ni, Cu, Mg) и примеси железа. Содержание последнего в ряде сплавов ограничивается 0,35-0,50 %, но для некоторых марок поршневых сплавов AA336.0, AA339.1, RedX131 (США), ACSB (Япония), KS245 (Германия) его концентрация допускается до 0,90-1,2 %. По своему составу данные сплавы близки к широко применяемому в странах СНГ сложнoleгированному силумину АК12М2МгН (АЛ25). В зависимости от соотношения легирующих элементов в его структуре кроме α -твердого раствора кремния и меди в алюминии и эвтектического кремния присутствуют фазы: ϵ – Al_3Ni ; θ – $CuAl_2$; δ – Al_3CuNi ; γ – Al_7Cu_4Ni ; T – Al_9FeNi ; β – Al_5FeSi ; π – $Al_8FeMg_3Si_6$; Q – $Al_5Cu_2Mg_8Si_6$; M – Mg_2Si [1].

Ряд исследователей констатировали положительное влияние железа на жаропрочность поршневых сплавов, но при этом отмечали и резкое снижение их пластичности по причине выделения β -фазы, характеризующейся высокой микротвёрдостью и неблагоприятной морфологией [2].

Для изыскания резервов в повышении надёжности поршней необходимо изучить влияние химического состава поршневых сплавов и их структуры на жаропрочность. К важнейшему структурному фактору, влияющему на жаропрочность, относится устойчивость твёрдого раствора. Наиболее устойчивые при повышенных температурах твёрдые растворы в алюминии образуют элементы с низким коэффициентом диффузии в нём, так как параметры диффузии являются одной из важнейших характеристик, силы межатомной связи кристаллической решётки. Качественное представление о характере диффузии некоторых элементов в твёрдых сплавах дают данные о их диффузии в жидком алюминии при температуре 700 °С (таблица 1) [3].

Таблица 1. – Коэффициенты диффузии легирующих элементов в жидком алюминии при 700 °С [3].

Элементы	Si	Cu	Ni	Fe	Mn
$D \cdot 10^{-5}, \text{См}^2/\text{с}$	81	7,2	1,5	1,4	0,6

На основании приведенных данных можно предположить, что переходные металлы, замещая атомы алюминия в твёрдом растворе, уменьшают самодиффузию алюминия и смещают начало интенсивного процесса диффузии в область более высоких температур. Кроме того, атомы переходных металлов с атомами других элементов (например, медью) могут образовывать устойчивые атомные комплексы в твёрдом растворе алюминия, что также повышает жаропрочность сплавов [2]. Исследование параметров кристаллической решетки твёрдого раствора переходных металлов в алюминии показало, что даже в условиях относительно небольших скоростей кристаллизации (литьё в кокиль, жидкая штамповка) удаётся получать пересыщенные (по сравнению с равновесной диаграммой состояния) твёрдые растворы в алюминии таких элементов, как Ti, Mn, Zr, Fe, V и др.

Таким образом, легирование переходными металлами способствует образованию пересыщенных твёрдых растворов в промышленных литейных алюминиевых сплавах уже в процессе литья.

На жаропрочность алюминиевых сплавов существенное влияние оказывает также включения интерметаллидных фаз, которые подразделяются на 5 групп [3]. К четвёртой и пятой группам относятся соединения, отличающиеся наиболее высокой остаточной микротвёрдостью и располагающиеся преимущественно по границах зёрен α -твёрдого раствора. Соединения, содержащие железо, с одной стороны повышают жаропрочность, а с другой – способствуют снижению пластичности. Проблему пластичности можно решить путём изменения морфологии и размеров железосодержащих фаз. При этом следует ожидать и стабилизацию относительного удлинения. Известно, что в поршневых сплавах железо снижает коэффициент линейного расширения сильнее, чем никель, кремний и медь. Так при отсутствии железа $\alpha = 23 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, а при содержании его $\sim 1,0 \%$ в сплаве α составляет $21,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [4].

На уровень жаропрочности поршневых сплавов положительно влияет также измельчение зерна α -твёрдого раствора. Для этих целей широко используется модифицирование расплава цирконием, который целесообразно вводить в расплав в виде соли K_2ZrF_6 [4].

Для исследований были выбраны 2 состава сплава АК12М2МгН, содержащие 0,8 и 1,0 % железа. В качестве модифицирующей обработки использовали добавку 0,8 % K_2ZrF_6 и 0,05 % серы, а содержание марганца в сплаве поддерживали на верхнем допустимом пределе – 0,5 %.

Анализировали предел прочности сплава при растяжении ($\sigma_{\text{в}}$), твёрдость по Бринеллю (НВ), относительное удлинение (δ) и определяли время до разрушения образцов в часах при температуре 300 °С и нагрузке 60МПа. Результаты исследований представлены в таблице 2.

Как видно из представленных результатов комплексная обработка расплава 0,8% K_2ZrF_6 и 0,05% серы обеспечивает получение относительного удлинения сплава АК12М2МгН с содержанием 1,0 % железа на уровне 0,5 % при прочности 220 МПа и твёрдости 960 МПа. Полученные данные превышают аналогичные показатели для исследуемого сплава с 0,8 % железа без обработки.

Таблица 2. Результаты испытания сплава АК12М2МгН с различным содержанием железа и вариантами модифицирования

Свойства сплава	Содержание железа 0,8 %			Содержание железа 1,0 %		
	Модифицирующая обработка					
	Без обработки	0,8%K ₂ ZrF ₆	0,8%K ₂ ZrF ₆ +0,05%S	Без обработки	0,8%K ₂ ZrF ₆	0,8%K ₂ ZrF ₆ +0,05%S
σ _в , МПа	180	220	235	180	190	220
НВ, МПа	910	950	950	950	960	960
δ, %	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5
Время до разрушения при 300 °С и σ _в =60 МПа	65	74	90	60	72	95

Учитывая, что основным критерием работоспособности поршневых сплавов является их жаропрочность, были проведены исследования на длительную теплопрочность при температуре 300 °С и нагрузке 60 МПа до полного разрушения образцов. Испытание показали, что повышение содержания железа в сплаве с 0,8 % до 1,0 % вызывает разрушение образца на 5 часов быстрее, если расплав не подвергается дополнительной обработке. Аналогичная зависимость наблюдается и в случае обработки расплава 0,8%K₂ZrF₆, когда время до разрушения снижается с 75 до 72 часов. Более высокий уровень жаропрочности сплава АК12М2МгН в случае его обработки K₂ZrF₆ можно объяснить стабилизирующим действием циркония на α-твёрдый раствор.

Совсем иная картина наблюдается при комплексной обработке сплава 0,8%K₂ZrF₆ и 0,05 % серы. В этом случае сплав с 1,0 % железа разрушается только после выдержки под нагрузкой 95 часов, а для сплава с 0,8 % железа данный показатель составляет 90 часов. Округлые включения фазы AlSiFeMn весьма устойчивы и плохо растворяются в твёрдом растворе. Вследствие этого мелкие частицы фазы, блокируя границы зёрен твёрдого раствора, препятствуют диффузии и тормозят дислокации, повышая жаропрочность сплавов.

Таким образом, увеличение концентрации железа с 0,8 % до 1,0 % в сплаве АК12М2МгН и дополнительная его обработка 0,8%K₂ZrF₆ и 0,05 серы обеспечивает повышение времени до разрушения с 65 до 95 часов.

Список использованных источников

1. Белов, Н. А. Анализ пятикомпонентных диаграмм состояния в области составов поршневых сплавов / Н. А. Белов, Н. Н. Авксентьева // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 2005. - № 4. – С. 47-56.
2. Повышение ресурса работы поршней двигателей внутреннего сгорания / Б.М. Неменёнок, М.А. Садоха, В.И. Гутко, В.А. Калиниченко // Литьё и металлургия. – 2005. - № 2(Ч.1). – С. 175-178.
3. Колобнев, И.Ф. Жаропрочность литейных алюминиевых сплавов / И.Ф. Колобнев. – М.: Наука, 1966 – 300 с.
4. Строганов, Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием / Г.Б. Строганов, В.А. Ротенберг, Г.Б. Гершман. – М.: Металлургия, 1977. – 272 с.