

The temperature regimes of piston of the internal combustion engines depending on the engine capacity are given. There is made overview of the existing ways of increase of working life of pistons of diesel engines, influence of structural components on high-temperature strength of aluminium alloys is analyzed. There is offered to study the possibility of increase of iron contents in piston alloys on the basis of microhardness intermetallic compounds.

Б. М. НЕМЕНЕНОК, В. А. КАЛИНИЧЕНКО, БИТУ,
М. А. САДОХА, В. И. ГУТКО, НП РУП «Институт БелНИИЛит»

УДК 669.715

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА РАБОТЫ ПОРШНЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Анализ условий работы поршней современных тяжело нагруженных двигателей показывает, что в процессе работы они воспринимают значительные нагрузки, меняющиеся в течение одного цикла по знаку и направлению, причем давление газов, воздействующих на поршень, может превышать 800 Н/см^2 . Повышению уровня напряжений в отдельных зонах поршня способствуют концентраторы, функцию которых могут выполнять канавки, выступы и т.д. В настоящее время поршни автотракторных двигателей должны обеспечивать безаварийную работу двигателя в течение более 6000 часов, а это значит, что за время службы поршня напряжения в нем меняются по знаку более $4 \cdot 10^8$ раз, что во много раз превышает число циклов, принимаемых обычно за базу при проведении усталостных испытаний [1]. Поэтому к сплавам для поршней предъявляются следующие требования:

1) пониженная плотность сплава, что обеспечивает снижение нагрузки на шатун;

2) низкий коэффициент термического расширения, так как у цилиндров двигателей данный показатель в 2 раза меньше. При низком коэффициенте у алюминиевого поршня необходимо делать минимальный зазор между поршнем и цилиндром, что будет способствовать повышению мощности двигателя, меньшему расходу смазывающего вещества и горючего, а также увеличению срока эксплуатации цилиндров, поршневых колец и поршней;

3) повышенная теплопроводность, обеспечивающая быстрый отвод тепла от камеры сгорания двигателя;

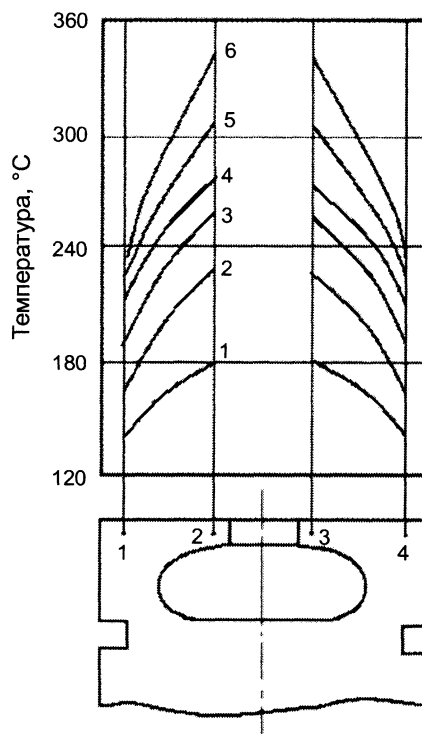
4) повышенная твердость, так как данный показатель определяет износостойкость поршней;

5) высокая плотность литья, так как проникновение газа в поры и микротрещины приводит к быстрому разрушению поршней;

6) стабильность структуры поршня, так как структурные изменения могут привести к объем-

ному изменению поршня (к явлениям «роста»), его заклиниванию и быстрому выходу из строя.

К особенностям условий работы поршней следует также отнести высокую температуру продуктов сгорания топлива, с которыми поршень контактирует. Эти газы, температура которых может достигать 2000°C , обуславливают разогрев днища поршня при определенных режимах работы до температуры 350°C и более. На рисунке приведено температурное поле днища поршня с камерой сгорания ЦНИДИ в зависимости от нагрузки двигателя.



Температурное поле днища поршня в зависимости от нагрузки двигателя: 1 – холостой ход; 2 – 50 л.с.; 3 – 100; 4 – 130; 5 – 165; 6 – 175 л.с.

Создание новых конструкций двигателей и форсирование режимов работы существующих для

получения мощности 250–300 л.с. и более способствуют дальнейшему увеличению термонапряженного состояния поршней, что повышает требования к их конструкции и химическому составу. Форсирование двигателей вызывает усиленный износ канавки под верхнее компрессионное кольцо и разупрочняет материал поршня в зоне камеры сгорания и бобышек под поршневой палец.

Для увеличения износостойкости канавки под верхнее компрессионное кольцо используется установка упрочняющего кольца из специального чугуна (нирезиста) или стали. Наряду с этим для снижения температуры поршня применяется его принудительное охлаждение за счет выполнения в днище кольцевого канала [2]. В последнее время для решения вопросов упрочнения канавки под верхнее компрессионное кольцо и кромок камеры сгорания начинают применять композиционные материалы. Все эти конструкторские решения требуют выполнения дополнительных приемов как в технологии при литье поршней, так и в конструкции кокильного оборудования. Следует также учитывать, что на работоспособность поршня основное влияние оказывают напряжения, вызванные температурными градиентами по телу поршня, а уменьшение этих напряжений за счет изменения конструкции поршня ограничено.

Анализ методов, обеспечивающих снижение градиента температур между юбкой и днищем поршня, позволил заключить, что наиболее эффективным способом тепловой защиты является формирование на критических поверхностях теплозащитного оксидного покрытия на основе Al_2O_3 [3]. Такое покрытие обладает необходимой теплостойкостью и высокой адгезией с алюминиевой основой, так как формируется на поршне за счет его микродугового оксидирования. При испытаниях на термоциклирование поршни с теплозащитным покрытием выдерживают более 3900 циклов, а срок их службы при соблюдении всех необходимых технологических условий возрастает в 2–3 раза [3]. Однако такая технология позволяет защитить только камеру сгорания и требует значительного расхода электроэнергии для нанесения покрытия методом анодного микродугового оксидирования.

Для изыскания резервов в повышении надежности поршней необходимо оценить влияние химического состава поршневых сплавов и их структуры на жаропрочность. К важнейшему структурному фактору, влияющему на жаропрочность, относится устойчивость твердого раствора.

Наиболее устойчивые при повышенных температурах твердые растворы в алюминии образуют элементы с низким коэффициентом диффузии в нем, так как параметры диффузии являются одной из важнейших характеристик силы межатомной связи кристаллической решетки. Каче-

ственное представление о характере диффузии некоторых элементов дают данные о их диффузии в жидком алюминии при температуре 700°C [4].

Элемент	Si	Cu	Ni	Fe	Mn
$D \cdot 10^3$, см ² /с	81	7,2	1,5	1,4	0,6

Из сопоставления приведенных выше данных видно, что коэффициент диффузии Cu, Ni, Fe и Mn в алюминии более низкий по сравнению с кремнием. Учитывая это, а также то, что легирование переходными металлами способствует повышению силы межатомной связи в кристаллической решетке с другими атомами, находящимися в твердом растворе в алюминии, можно сделать следующий вывод: переходные металлы, замещая атомы алюминия в твердом 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 твердом растворе алюминия, что также повышает жаропрочность сплавов.

Экспериментальные данные показывают, что сравнительно жаропрочными могут быть лишь те сплавы, которые отвечают по составу устойчивым первичным твердым растворам, комплексно легированным элементами с низким коэффициентом диффузии.

Исследование параметров кристаллической решетки твердого раствора переходных металлов в алюминии показало, что даже в условиях относительно небольших скоростей кристаллизации (литье в кокиль, центробежное литье, жидкая штамповка) удается получать пересыщенные (по сравнению с равновесной диаграммой состояния) твердые растворы в алюминии таких элементов, как Ti, Mn, Cr, Zr, Fe, V и др. Таким образом, легирование переходными металлами способствует образованию пересыщенных твердых растворов в промышленных литейных алюминиевых сплавах уже в процессе литья.

В высокофорсированных дизельных двигателях с турбонаддувом используют поршни из эвтектического силумина, легированного медью, магнием и никелем (AK12M2MgNi). Наличие в сплаве меди усиливает межатомные связи твердого раствора, содержащего Mn, Mg и другие аналогичные элементы. Кроме того, при распаде твердого раствора сложного по составу сплава образуются дисперсные частицы фазы Т (Al_2Mn_2Cu), которые участвуют в создании микрогетерогенности внутри зерен твердого раствора, что затрудняет их деформацию. Избыточная медь участвует в образовании никельсодержащей фазы Т (Al_6Cu_3Ni), которая кристаллизуется в разветвленной форме — ее частицы, располагаясь по границам зерен

твердого раствора, блокируют их и тем самым обеспечивают значительное повышение жаропрочности сплава. Однако содержание меди в сплаве следует ограничить 3%, так как при ее избытке в структуре сплава появится фаза CuAl_2 , способствующая его охрупчиванию, понижению корро-

зионной стойкости и повышению склонности к объемным изменениям («росту» поршней).

На жаропрочность алюминиевых сплавов существенное влияние оказывают также включения интерметаллидных фаз. По жаропрочности они подразделяются на пять групп (см. таблицу).

Микротвердость металлических соединений, образующихся в алюминиевых сплавах, при 20 и 300 °С и различных выдержках при испытаниях (нагрузка 0,098 Н)

Наименование соединения	H_{μ} при 20°С и выдержке 30 с, Н/мм ²	H_{μ} при 300°С и выдержке, Н/мм ²		$H_{\mu}^{30\text{ с}} - H_{\mu}^{30\text{ мин}}$, Н/мм ²		H_{μ} при 300°С и выдержке 60 мин, Н/мм ²	$H_{\mu}^{30\text{ с}} - H_{\mu}^{60\text{ мин}}$, Н/мм ²	
		30 с	30 мин	Н/мм ²	%		Н/мм ²	%
I группа (637–1176 Н/мм ²)								
в (Al_3Mg_2)	2754	2636	1074	1562	59,3	634	2002	76,0
MgZn_2	4243	3724	1313	2411	64,7	967	2757	74,0
Г ($\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$)	4136	3430	1534	1896	55,3	1147	2283	66,6
II группа (1470–1960 Н/мм ²)								
Mg_2Si	5253	3950	2352	1598	40,5	1735	2215	56,1
CuAl_2	5204	4714	2607	2107	44,7	1970	2744	58,2
Г ($\text{Al}_6\text{Mg}_4\text{Cu}$)	4057	3920	1872	2048	52,2	1430	2490	63,5
III группа (2450–2548 Н/мм ²)								
$\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$	5830	5596	2813	2783	49,7	3087	2509	44,8
S (Al_2CuMg)	5527	4665	3038	1627	34,9	2185	2480	53,2
W ($\text{Al}_x\text{Mg}_y\text{Si}_4\text{Cu}_4$)	5684	4214	3077	1137	27,0	1646	2568	60,9
IV группа (3430–5390 Н/мм ²)								
П ($\text{Al}_8\text{Si}_6\text{Mg}_3\text{Fe}$)	5733	5586	4577	1009	18,1	3685	1901	34,0
Г ($\text{Al}_{10}\text{Mn}_2\text{Si}$)	8624	7644	5762	1882	24,6	4557	3087	40,4
Г ($\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu}$)	6154	6154	5233	921	15,0	4430	1724	28,0
Al_4Mn	8183	7781	6213	1568	20,2	4665	3116	40,0
Al_6Mn	6723	6154	5341	813	13,2	4042	2112	34,3
Al_7Cr	5096	5174	4488	686	13,3	3641	1533	29,6
Al_3Ni	5831	5738	4086	1652	28,8	3469	2269	39,5
б ($\text{Al}_4\text{Si}_2\text{Fe}$)	10750	8438	6370	2068	24,5	5071	3367	39,9
V группа (5390–7840 Н/мм ²)								
Г ($\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$)	9672	8398	6262	2136	25,4	5684	2714	32,3
Al_3SiFe	11240	10368	8624	1744	16,8	7693	2675	25,8
Al_3Fe	11240	10535	7536	2999	28,5	5498	5037	47,8

К четвертой и пятой группам относятся соединения, отличающиеся наиболее высокой остаточной микротвердостью. В большинстве своем в сплавах они располагаются по границам зерен α -твердого раствора и активно взаимодействуют с ним при более высоких температурах, чем соединения всех трех групп. Следовательно, их присутствие в сплавах способствует торможению диффузионных процессов и пластической деформации зерен α -твердого раствора.

Из этих групп следует обратить особое внимание на соединения, в состав которых входит железо, с одной стороны, оно повышает жаропрочность, а с другой — способствует снижению пластичности. Известные методы нейтрализации отрицательного влияния железа на свойства силуминов [5] позволяют значительно снизить его негативное действие. Поэтому представляет интерес более детально изучить возможность увеличения доли вторичных алюминиевых сплавов в составе шихты сплава АК12М2МгН при производ-

стве поршней. Возможное повышение загрязненности расплава неметаллическими включениями может быть устранено за счет рафинирующей обработки с использованием дегазатора мод. 46161, позволяющего совмещать продувку расплава с введением порошковых флюсов и модификаторов.

Литература

1. Строганов Г.Б., Ротенберг В.А., Гершман Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием. М.: Металлургия, 1977.
2. Технология и оборудование для литья поршней / Б.А.Краев, М.А.Садоха, А.П.Мельников и др. // Литье и металлургия. 2001. №4. С. 52–54.
3. Овчинников В.В., Зелинский В.Я. Анодное микродуговое оксидирование алюминиевых поршней — особенности технологии нанесения теплозащитного покрытия // Литье и металлургия. 2004. №1. С.112–114.
4. Колобнев И.Ф. Жаропрочность литейных алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1973.
5. Немененок Б.М. Теория и практика комплексного модифицирования силуминов. Мн.: Технопринт, 1999.