

Н. И. Габельченко, Е. Ю. Карпова, Д. Е. Фролов, В. В. Волощенко

**РАЗРАБОТКА СОСТАВА ЧУГУНА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СТРУКТУРЫ,
СВОЙСТВ И УВЕЛИЧЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ОТБЕЛЕННОГО СЛОЯ
КУЛАЧКОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ВАЛА**

Волгоградский государственный технический университет

email: e-mail: lp@vstu.ru

Данная работа посвящена разработке эффективной технологии упрочнения кулачков распределительного вала, отлитого из серого перлитного чугуна. В результате проведенных исследований было доказано, что изготовление распределительных валов из серого чугуна с отбеленными кулачками перспективно для автомобильных двигателей, особенно при интенсивных режимах эксплуатации. Наиболее рациональной технологией отбеливания рабочей поверхности кулачков распределительного вала из серого чугуна является отливка в песчано-глинистую форму с установкой холодильников в полости, формирующие носовую часть кулачка

Ключевые слова: чугун с пластинчатым графитом, распределительный вал, оптимизация химического состава чугуна, упрочнение

N. I. Gabelchenko, E. Yu. Karpova, D. E. Frolov, V. V. Voloschenko

DEVELOPMENT OF CAST IRON COMPOSITION TO IMPROVE THE STRUCTURE, PROPERTIES AND INCREASE THE THICKNESS OF THE CHILLED LAYER OF CAMSHAFT CAMS

Volgograd State Technical University

This work is devoted to the development of an effective technology for strengthening camshaft cams cast from gray pearlitic cast iron. As a result of the conducted studies, it was proven that the manufacture of camshafts from gray cast iron with chilled cams is promising for automobile engines, especially under intensive operating conditions. The most rational technology for whitening the working surface of camshaft cams made of gray cast iron is casting in a sand-clay mold with the installation of coolers in the cavities that form the nose of the cam.

Keywords: cast iron with lamellar graphite, camshaft, optimization of the chemical composition of cast iron, strengthening

Введение

Наиболее важной и сложной по точности изготовления и нагруженности в эксплуатации деталью газораспределительного механизма (ГРМ) современного автомобильного двигателя, является распределительный вал (РВ). Конструктивно распредвал представляет собой длинный стержень, на котором в строго определенном порядке расположены кулачки и опорные шейки. Регулируя порядок и продолжительность открывания и закрывания клапанов, распределительный вал обеспечивает слаженную работу камер сгорания многоцилиндрового механизма, поэтому его эксплуатационные показатели определяют надежность, долговечность и эффективность работы двигателя в целом. Повышенный износ кулачков вала приводит к снижению мощности двигателя, а выход распределительного вала из строя может потребовать капитального ремонта двигателя с заменой клапанов, головки блока, нередко и блока цилиндров [1].

Изнашивание вершин кулачков, происходящее при высоких удельных нагрузках и высокой температуре в условиях ограниченной смазки в присутствии абразивных частиц, является сложным процессом, при котором поверхностный слой испытывает режущее и царапающее действие абразивных частиц, присутствующих в смазке, пластическую деформацию, схватывание с ответной поверхностью толкателя, вызывающее образование задиров. Сопротивляться такому интенсивному воздействию способны только специальные стали в состоянии упрочняющей термической обработки или отбеленный чугун, из которых изготавливают распределительные валы современных двигателей.

Поэтому целью работы являлась разработка эффективной технологии упрочнения кулачков распределительного вала, отлитого из серого перлитного чугуна.

Методика исследования

Объектом исследования были чугуны с пластинчатым графитом для изготовления распределительных валов автомобильных двигателей с отбеленными носиками кулачков, предметом исследования – химический состав чугунов и структура отбеленного слоя, сформированного при литье с помощью установленных в литейной форме холодильников и при закалке ТВЧ с оплавлением.

На первом этапе исследования выполняли оптимизацию химического состава чугуна на основе минимизации кремниевого эквивалента эвтектики. В качестве исходной базы оптимального состава использовали чугуны, применяемые для изготовления распределительных валов наиболее известных отечественных и зарубежных производителей (табл. 1).

Сравнительную оценку отбеливающего действия многокомпонентных составов эвтектики разных чугунов можно производить с помощью предложенной в работе [2] комплексной характеристики химического состава – кремниевого эквивалента. Кремниевый эквивалент эвтектики представляет собой концентрацию кремния, которая по действию на графитизацию эвтектики эквивалентна всему многокомпонентному составу эвтектики и учитывает влияние и отбеливающих и графитизирующих компонентов в тех реальных количествах, в которых они содержатся в эвтектической жидкости после протекания всех микроликвационных процессов первичной кристаллизации дендритов.

Таблица 1

**Химический состав серых чугунов, применяемых для изготовления распределительных валов
автомобильных двигателей в России и за рубежом**

Страна- производитель	Содержание элементов в чугуне, %								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Cu	Ni
Россия (ОАО ГАЗ)	3,5–3,6	0,75–0,95	1,9–2,2	До 0,2	0,1–0,15	0,2–0,3	–	–	–
Швеция (ф.Вольво)	3,5–3,6	0,75–0,95	1,9–2,2	До 0,2	0,1–0,15	До 1	1,0	–	0,5
Франция (ф.Рено)	3,3–3,4	0,8–1,0	1,5–1,8	До 0,05	До 0,05	–	0,15–0,2	–	–
Япония (Riken Co)	3,0–3,8	0,5–1,0	1,6–2,8	До 0,3	До 0,15	0,1–1,0	0,5	–	1,0
Польша (FSO)	3,1–3,5	0,5–0,8	1,8–2,2	До 0,2	До 0,15	0,7–0,9	–	0,7	0,3

На втором этапе работы проводили сравнительные исследования двух способов получения отбела:

– в процессе затвердевания отливки в форме с применением холодильника и краски, содержащей теллур;

– при термической обработке путем нагрева ТВЧ до оплавления поверхности.

Чугун выплавляли в дуговой печи с кислой футеровкой. Для составления шихты использовали чушковые передельный ПВК1 и литейный Л4 чугуны, возврат чугуна СЧ20, стальной лом, коксик, ферросплавы: ферросилиций ФС45, ферромарганец ФМн70 и феррохром ФХ400Б.

Заливку проводили при температуре 1360–1420 °С в сырые песчано-глинистые формы с установкой холодильников в полости, оформляющие носики кулачков и без холодильников.

Кулачки распредвала, залитого в форму без холодильника и не имевшего отбела в состоянии после литья, подвергали закалке ТВЧ с оплавлением. Нагрев кулачков до температуры 1160–1200 °С производили в кольцевом индукторе с питанием от преобразователя (частота 10 кГц) в течение 3–5 с, затем питание отключали и охлаждали водой.

Результаты отбеливания оценивали путем измерения твердости и металлографического исследования. Твердость отбеленной поверхности измеряли на приборе ТК-14, сердцевины кулачка – на прессе Бринелля. Распределение твердости по толщине отбеленного слоя изучали с помощью прибора ПМТ-3 при нагрузке 50 г.

Микроструктуру в отбеленной и переходной зонах, а также в сердцевине кулачков изучали при увеличениях от $\times 100$ до $\times 500$ крат на

нетравленных шлифах и после химического травления в 4 % нитале.

Обсуждение результатов исследования

Формирование в чугуне ледебурита или графитной эвтектики в зависимости от химического состава и интенсивности охлаждения можно с достаточной степенью приближения задать, используя структурную диаграмму Г. И. Сльмана [3], если определить углеродный эквивалент C_e , как сумму содержания углерода и 1/3 от кремниевого эквивалента эвтектики, который воздействует на графитизацию также, как все компоненты состава чугуна вместе, учитывая при этом влияние микроликвации, существенно изменяющей состав эвтектической жидкости.

Кремниевый эквивалент рассчитывается по формуле [2]:

$$[C_{Si}]_C^{эвт} = \sum \frac{C_0^i(1-K_{эф}^i f_d)}{1-f_d} K_C^i,$$

где C_0^i – содержание каждого компонента состава чугуна, $K_{эф}^i$ – эффективный коэффициент распределения компонента i между твердой и жидкой фазой при дендритной кристаллизации, f_d – объемная доля дендритной составляющей структуры, K_C^i – коэффициент изоактивности, который показывает, как действует каждый i -й компонент состава на активность углерода в растворе в сравнении с кремнием и имеет отрицательное значение для отбеливающих компонентов и положительное для графитизирующих.

Коэффициенты эффективного распределения и изоактивности для компонентов чугуна имеют следующие значения [3]:

	Si	Mn	Cr	V	Ni	Cu	Mo
$K_{эф}^i$	1,6	0,90	0,70	0,98	1,06	1,05	0,81
K_C^i	1	-0,20	-0,94	-1,33	0,19	0,20	0,78

Объемную долю дендритов в отливках с разной толщиной стенки из чугуна с разной степенью эвтектичности, S_e , можно определить по графическим зависимостям, показанным на рис. 1.

Результаты расчета по поданной методике углеродного эквивалента чугунов, применяемых

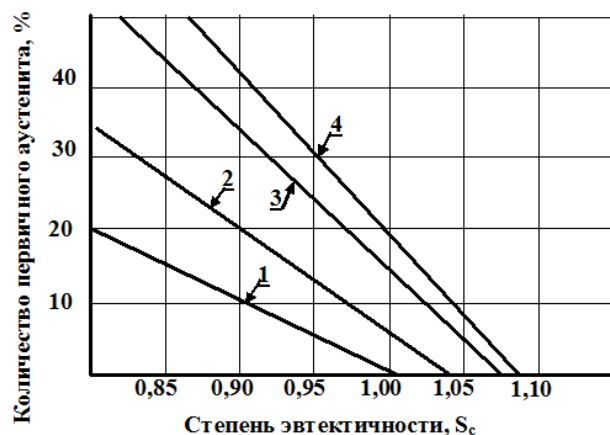


Рис. 1. Зависимость объемной доли дендритов от степени эвтектичности и скорости охлаждения чугуна при равновесной кристаллизации (1) и в отливках с толщиной стенки –30(2), 15(3) и 10(4) мм

ведущими фирмами изготовителями распределительных валов, приведены в табл. 2.

Для выбора оптимального химического состава чугуна, применение которого для изготовления распределительного вала обеспечит перлитную металлическую основу в основном объеме детали, исключит появление отбела в нежелательных местах отливки (опорных шейках Ø30–35 мм) и позволит с помощью установки в форму холодильников получить отбеленный слой толщиной 3–5 мм на рабочей поверхности, использовали структурную диаграмму, предложенную Г. И. Сильманом [4, 5] (рис. 2).

Из диаграммы Г. И. Сильмана следует, что в отливках с толщиной стенки менее 17,5 мм наряду с графитовой эвтектикой возможно образование ледебурита, поэтому для изготовления распределительных валов с опорными шейками Ø30–35 мм (приведенная толщина стенки – 15–17,5 мм), в которых отбел недопустим, чугуны с $C_s \leq 3,63$ % использовать не рекомендуется.

Таблица 2

Результаты расчета углеродного эквивалента чугунов, применяемых для изготовления распределительных валов автомобильных двигателей

Фирма (страна)	Содержание элементов в чугуне, % масс							S_e	f_d	$[C_{Si}]_C^{эвт}$ %	C_s^{min} %
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Cu	Ni				
ОАО ГАЗ (Россия)	3,5–3,6	0,75–0,95	1,9–2,2	0,2–0,3	–	–	–	1	0,15	1,19	3,90
Фирма Вольво (Швеция)	3,5–3,6	0,75–0,95	1,9–2,2	до 1	0,5	–	0,5	1	0,15	0,31	3,60
фирма Рено (Франция)	3,3–3,4	0,8–1,0	1,5–1,8	–	0,15–0,2	–	–	0,91	0,33	1,07	3,66
Фирма Riken Co (Япония)	3,0–3,8	0,5–1,0	1,6–2,8	0,1–1,0	0,5	–	1,0	0,98	0,17	–0,02	3,0
Фирма FSO (Польша)	3,1–3,5	0,5–0,8	1,8–2,2	0,7–0,9	–	0,7	0,3	0,94	0,25	0,75	3,35

Расчеты углеродного эквивалента показали, что наилучшим вариантом для изготовления распредвала является химический состав № 1, который был использован для отливки экспериментальных валов.

В соответствии с требованиями ГОСТ 53808–2010 распределительные валы могут изготавливаться из серого чугуна марки СЧ21–40 с отбеленными вершинами кулачков. Твердость отбеленных поверхностей вала должна быть не менее 49HRC, твердость неотбеленных поверхностей и сердцевин валов – 229...285HB. Глубина отбеленного слоя на вершинах кулач-

ков со стороны наибольшего расстояния от оси вала должна быть не менее 2,0 мм.

Экспериментальные распределительные валы были отлиты из серого чугуна с пластинчатым графитом в сырые песчано-глинистые формы.

В одну из форм были установлены холодильник для формирования отбеленного слоя на рабочей поверхности кулачков, вторая форма была изготовлена без холодильников и залита тем же чугуном.

Химический состав чугуна содержал 3,57 %C; 0,77 %Mn; 2,05 %Si; 0,27 %Cr.

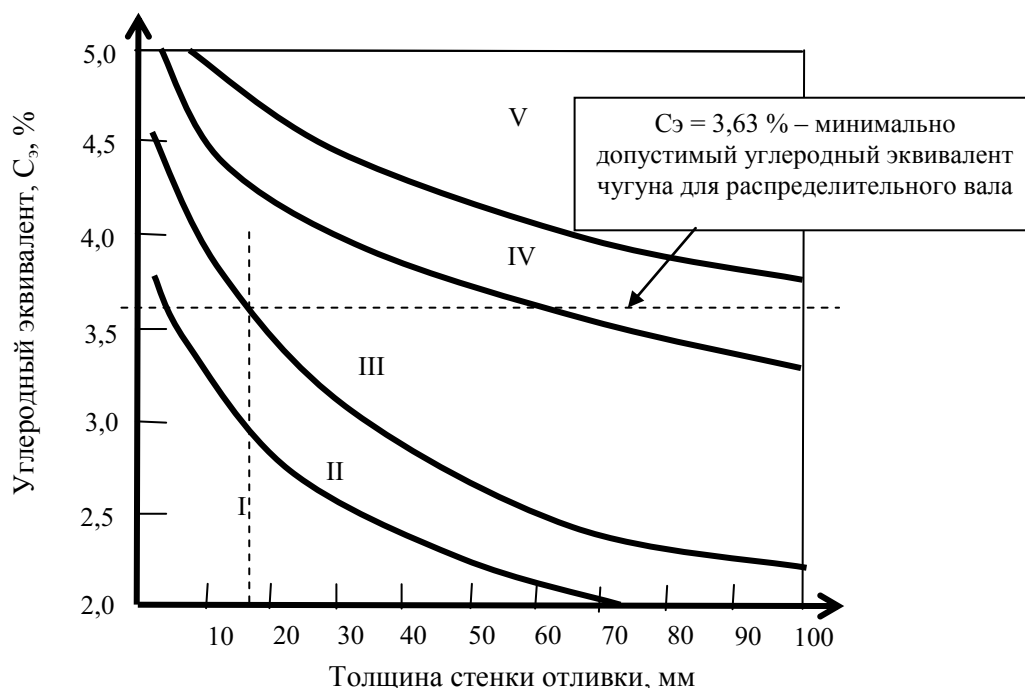
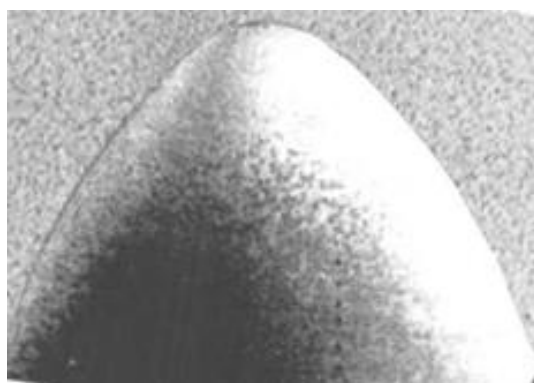


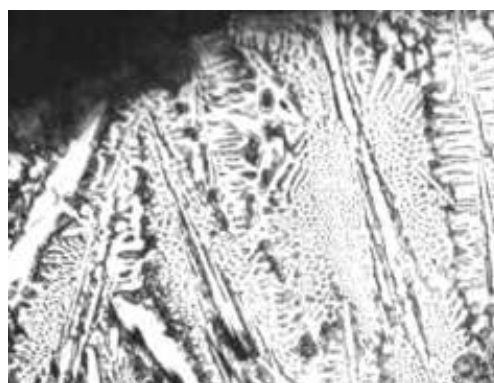
Рис. 2. Структурная диаграмма для выбора химического состава чугуна для отбеленных отливок, получаемых в сырых формах

В отливке, изготовленной в форме с установленными холодильниками, в процессе затвердевания был сформирован отбеленный слой, толщиной 5 мм (рис. 3, а). Микрострук-

тура отбеленного с помощью холодильника носика кулачка представляла собой ледебурит с выраженной ориентацией эвтектических колоний в направлении теплоотвода (рис. 3, б).



а



б

Рис. 3. Макро- (а, $\times 3$) и микроструктура (б, $\times 100$) носика отбеленного кулачка

Твердость опорных шеек отлитых валов составила HB 230–235, на отбеленных кулачках – HRC50–52.

Рабочую поверхность кулачков на валах, отлитых без отбела, подвергли нагреву ТВЧ до оплавления верхнего слоя, затем охлаждали водой. Твердость поверхности закаленного слоя составила HRC45 – 49 в сердцевине HB 230–235.

При исследовании микрошлифов в нетравленном состоянии была выявлена подповерхно-

стная пористость, простиравшаяся на глубину 0,5 мм и расположенная полосой параллельной образующей кулачка. Поры неправильной формы с округлыми контурами, преимущественно мелкие, но некоторые из них достигали размеров 0,25 мм, имели гладкие блестящие стенки, характерные для газовой пористости, появившейся в результате быстро протекавших процессах расплавления и затвердевания металла (рис. 4).

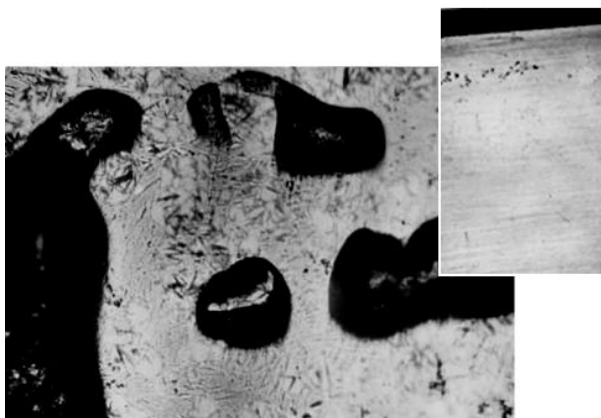


Рис. 4. Пористость закаленного ТВЧ слоя на кулачках распредвала, $\times 250$, на врезке, $\times 2$

В микроструктуре поверхностного слоя, претерпевшего расплавление, графитовой фазы не обнаружено, эвтектика представлена мелкоячеистым ледебуритом, присутствуют мелкие первичные дендриты, металлическая основа состоит из крупноигльчатого мартенсита и остаточного аустенита (рис. 5).

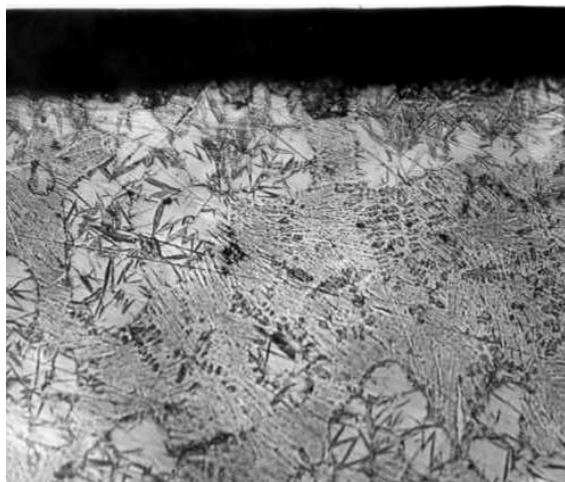


Рис. 5. Микроструктура отбеленного слоя, полученного закалкой кулачков ТВЧ с оплавлением, $\times 100$

Микротвердость ледебуритных участков достигает 10110 МПа, мартенситно-аустенитных – 6000–6700 МПа. В переходной зоне неполного расплавления появляются отдельные не растворившиеся крупные пластины графитовой фазы, соседствующие с ледебуритной эвтектикой тонкого строения, сформировавшейся из расплавленного металла (рис. 6). Общая толщина отбеленного слоя (с учетом переходного) составила 2,8 мм, толщина упрочненного слоя с учетом закалки на мартенситно-аустенитную структуру – 3,5 мм.

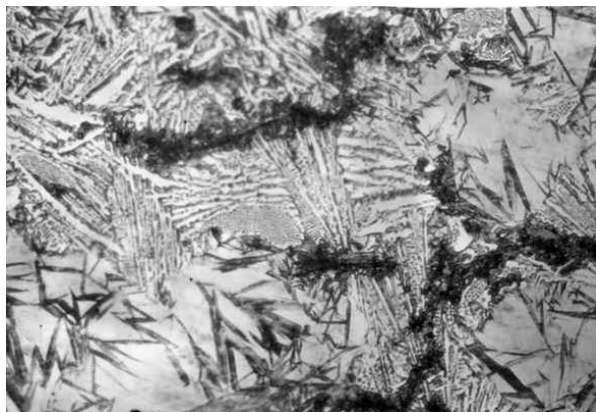


Рис. 6. Микроструктура переходного частично расплавленного слоя кулачка распредвала после закалки ТВЧ с оплавлением, $\times 500$

Таким образом, путем нагрева ТВЧ до температуры выше температуры плавления отбеленный слой с заданными параметрами в части толщины и твердости получить удалось, но при этом развилась газовая пористость, которая является неприемлемым дефектом кулачков распределительного вала.

Выводы

Из выполненных анализа состояния вопроса и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы;

1. Изготовление распределительных валов из серого чугуна с отбеленными кулачками перспективно для автомобильных двигателей, особенно при интенсивных режимах эксплуатации;

2. Оптимальный химический состав чугуна для распределительных валов с отбеленными кулачками содержит 3,5–3,6 %C; 0,75–0,95 % Mn; 0,2–0,3 % Cr, не более 0,15 %S и 0,2 % P.

3. Наиболее рациональной технологией отбеливания рабочей поверхности кулачков распределительного вала из серого чугуна является отливка в песчано-глинистую форму с установкой холодильников в полости, формирующие носовую часть кулачка.

Отбеливание кулачков путем закалки ТВЧ с оплавлением рабочей поверхности не рекомендуется вследствие развития газовой пористости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крючков, О. Н. Износостойкость литых деталей газораспределительного механизма автомобильных двигателей / О. Н. Крючков, М. М. Левитан // Автомобильная промышленность, 1986. – № 1. – С. 3–11.

2. Ильинский, В. А. Закономерности микроликвации в железоуглеродистых сплавах и новые возможности литейной технологии / В. А. Ильинский, А. А. Жуков, Л. В. Костылева // Международный конгресс литейщиков МКЛ-55. – М. : Машиностроение, 1988

3. Ильинский, В. А. Оценка качества серого чугуна по кремниевому эквиваленту химического состава / В. А. Ильинский // Литейное производство. – 1987. – № 4. – С. 3–5.

4. Сильман, Г. И. Чугуны. Рекомендации по выбору марки чугуна для литых деталей машин и оборудования : учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. / Г. И. Сильман. – Брянск : Изд-во Брянской государственной инженерно-технологической академии, 1999. – 60 с.

5. Сильман, Г. И. Термодинамика и термокинетика структурообразования в чугунах и сталях / Г. И. Сильман. – М. : Машиностроение, 2007. – 302 с.