

О. И. Шинский, В. И. Литовка, Н. И. Тарасевич, С. И. Клименко, Н. Я. Терещенко,  
О. О. Токарева (ФТИМС НАНУ)

## Обоснование выбора типа чугуна для отливок блоков цилиндров дизельных двигателей

Эксплуатация картерных деталей большинства дизельных двигателей, в первую очередь, блоков цилиндров происходит в условиях воздействия значительных механических, термодинамических и вибрационных нагрузок длительного характера. Это требует использования для этих деталей материалов, которые по комплексу физико-механических, эксплуатационных характеристик и структуры обеспечивают достаточную надежность и долговечность двигателей. Актуальной является также проблема снижения металлоемкости отливок в направлении уменьшения толщин стенок последних при гарантированном обеспечении эксплуатационного ресурса, в том числе при увеличении мощности двигателей и удельных нагрузок на детали.

В настоящее время картерные отливки большинства дизельных двигателей традиционно изготавливают из низколегированного чугуна с пластинчатым графитом (ЧПГ) марок СЧ20 или СЧ25, которые обеспечивают в стенках толщиной 15-25 мм предел прочности при растяжении ( $\sigma_b$ ) в пределах 200-250 МПа, а более тонких сечениях – до 270 МПа [1, 2]. Для блоков цилиндров мощных двигателей фирма «General Motors» (США) использует специальные чугуны, легированные (в %): хромом (0,30-0,55), никелем (0,65-0,85) и молибденом (0,35-0,85), с пределом прочности до 350 МПа и твердостью 223-248 ед. НВ. Блоки цилиндров автомобиля КамАЗ (РФ) изготавливают из сложнолегированного серого чугуна (состав, %: 3,3-3,5 С; 2,1-2,3 Si; 0,5-0,7 Mn; 0,2-0,3 Cr; 0,12-0,20 Ni; 0,4-0,6 Cu; 0,05-0,10 Ti), однако по уровню прочностных характеристик такой чугун не отвечает предъявляемым требованиям.

Уровень основных физико-механических свойств металла в различных зонах картерных отливок зависит от толщины стенки и условий питания, причем, реальные показатели прочности и твердости в них могут существенно отличаться от тех уровней, которые определены на отдельно отлитых заготовках [3]. В этом случае не только действует масштабный фактор, но и образуются, в первую очередь, в тепловых узлах отливок дефекты усадочного происхождения, которые снижают

Выполнен сравнительный анализ литейных, физико-механических и эксплуатационных свойств основных типов чугунов – с графитом пластинчатым, компактным (вермикулярным), шаровидным. Исследованы статические, динамические, демпфирующие и другие характеристики чугунов со структурой графитовых включений, характерной для чугуна с вермикулярным графитом. Приведены результаты экспериментов по стабилизации структуры и свойств чугуна в отливках

прочность, плотность и герметичность чугуна. Кроме того, из-за разностенности и сложной конструкции в разных сечениях блоков цилиндров возникают литейные напряжения, которые также уменьшают конструкционную прочность и создают вероятность нарушения геометрической стабильности деталей в эксплуатации. Поэтому обоснованным является использование литых заготовок с сечениями, которые максимально приближены к преимущественным толщинам стенок и конфигурации реальных отливок, из которых вырезка образцов для изучения свойств чугуна нерациональна. Такой подход к изучению качества металла в отливках сложной конфигурации предусмотрен стандартом Японии (JISG5501), однако и при этом полной корреляции не наблюдается. Поэтому распространенную, особенно среди конструкторов, точку зрения о том, что перевод массивных картерных отливок из низких на более высокие марки серого чугуна для обеспечения надежности в эксплуатации без изменения конструкции деталей следует считать необоснованной и нецелесообразной. Необходимо отметить, что с повышением марки чугуна повышаются характеристики прочности, упругости и усталости при всех режимах циклического нагружения [1, 4]. Однако при этом достигается ухудшение следующих показателей: усложняется механическая обрабатываемость отливок из-за большей твердости металла; повышается уровень остаточных напряжений в отливках; снижается теплопроводность и увеличивается коэффициент линейного расширения, из-за чего ухудшается эксплуатационная надежность деталей; увеличивается количество литейных дефектов (раковины, рыхлоты) из-за низкой графитизирующей способности легированного чугуна; понижается демпфирующая способность и увеличивается чувствительность металла к концентраторам

напряжений, благодаря чему возрастает вероятность снижения долговечности деталей.

Известно [4, 5], что основными факторами регулирования физико-механических характеристик чугуна являются форма включений графита и структура металлической основы. Из трех основных типов чугуна (с пластинчатым – ЧПГ, вермикулярным – ЧВГ и шаровидным – ЧШГ графитом) ЧВГ имеет свойства, которые в комплексе наиболее полно обеспечивают требования к материалу для блоков цилиндров дизельных двигателей, в том числе большой мощности (табл. 1).

Особенностью свойств ЧВГ, которые выгодно отличают его от ЧПГ, является: значительно больший уровень показателей прочности, пластичности, упругости; меньшая твердость, особенно в тонких сечениях отливок. Кроме того, по усадке, температуропроводности и циклической вязкости (демпфирующей способности) ЧВГ лишь незначительно уступает чугунам с пластинчатым графитом. Чугун с шаровидным графитом имеет самые высокие значения прочности, пластичности и упругости, однако из-за высокого уровня предусадочного расширения (и вызванного этим большим объемом усадочных раковин) относительно низкие температуропроводность и демпфирующую способность этот материал (ЧШГ) для отливок блоков цилиндров практически не используется.

Особенности структуры и свойств ЧВГ предопределили более широкое применение его для деталей ответственного назначения, к которым предъявляются высокие требования по статическим, ударным, циклическим и термоциклическим характеристикам. Характерным примером таких отливок являются блоки цилиндров, которые, кроме указанных показателей, должны иметь одинаковую плотность в основных рабочих сечениях из-за необходимости многочисленных сверлений (крепительных, маслоканалов). Например, установлено [6, 7], что блоки цилиндров автомобилей КамАЗ (масса 265 кг, толщины стенок в

пределах 5-20 мм, мощность двигателя 380-450 л. с.) из ЧВГ, по сравнению с серым чугуном СЧ20, имеют конструкционную статическую прочность в 1,7-2,0, а усталостную прочность – в 1,5-1,7 раз большую. При этом полностью ликвидирован брак отливок по трещинам и созданы реальные возможности повышения мощности двигателя без изменения конструкции отливки и литниковой системы.

В дизелестроении за рубежом из ЧВГ (вместо легированного ЧПГ и ЧШГ) изготавливают головки и блоки цилиндров массой до 1000 кг. При этом достигается снижение твердости, гомогенизация структуры, сокращение брака литья и устранение операции термической обработки отливок [5].

В практике производства отливок из модифицированного чугуна в структуре последнего графит имеет, зачастую, не только шаровидную или компактную вермикулярную форму, а и смешанную с различной долей пластинчатого, шаровидного или компактного графита. Для количественной оценки усредненной степени сфероидизации графита (ССГ) рекомендуется пользоваться специально разработанными шкалами [4, 8], поскольку стандарт (ГОСТ 3443-85) таких шкал не содержит. Экспериментально (заливали клиновидные пробы, из которых вырезали образцы для механических испытаний; исходный чугун содержал 0,012 % серы и – 0,8 меди) показано, что при уменьшении показателя ССГ с 90-95 (чугун с шаровидным графитом) до 65-70 % (верхнее значение ССГ для чугуна с вермикулярным графитом) снижение предела прочности при растяжении, предела текучести и модуля упругости составляют не более 20-25, 15-20 и 10-15 % соответственно, однако при этом циклическая вязкость чугуна остается почти в 2 раза выше, чем в случае полностью шаровидного графита.

Усталостная прочность чугуна значительно менее чувствительна к изменению формы графита. Например, перлитный ЧВГ (по сравнению с ЧШГ) имеет предел усталости меньше на 18 и всего 7 %

соответственно на образцах без концентратора (гладкие образцы)  $\sigma_{-1}$  и с концентратором (образцы с надрезом)  $\sigma_{-1}^H$  напряжений. Коэффициент долговечности, который определяется как отношение предела усталости к пределу прочности при растяжении в отсутствии ( $\sigma_{-1} / \sigma_B$ ) и при наличии ( $\sigma_{-1}^H / \sigma_B$ ) концентраторов напряжений, увеличивается при переходе с ЧШГ на ЧВГ (табл. 2).

Таблица 1

**Основные характеристики чугунов с различной формой графита**

Характеристика	Тип чугуна		
	ЧПГ	ЧВГ	ЧШГ
Предел прочности, $\sigma_B$ , МПа	150-400	300-600	350-1000
Предел текучести, $\sigma_T$ , МПа	-	250-400	280-700
Относительное удлинение, $\delta$ , %	$\leq 1,5$	1,5-8,0	2-20
Твердость, НВ, МПа, $\times 10^{-1}$	140-300	140-280	120-380
Циклическая вязкость, $\delta_{ц}$ , %	6-12	2,5-6,5	1,0-2,5
Модуль упругости, Е, МПа, $\times 10^{-2}$	75-155	140-170	165-185
Объем усадочных раковин, %	1-3	1-5	5-9
Линейная усадка, %	1,0-1,2	0,9-1,1	0,7-1,0
Коэффициент линейного расширения, м/м·К $\times 10^6$	11-12	12-14	11,5-13,0
Температуропроводность, м <sup>2</sup> /с, $\times 10^6$	37-45	28-40	10-25

Таблица 2  
Зависимость усталостной прочности от формы графита в чугуне

Характеристика	Значение характеристики * при ССГ, %		
	65-70 (ЧВГ)	80-85 (ЧВГ+ЧШГ)	90-95 (ЧШГ)
$\sigma_B$ , МПа	610 / 75	740 / 92	810 / 100
$\sigma_{-1}$ , МПа	220 / 82	255 / 95	270 / 100
$\sigma_{-1}^H$ , МПа	180 / 93	190 / 97	195 / 100
$\sigma_{-1} / \sigma_B$	0,36 / 109	0,34 / 106	0,33 / 100
$\sigma_{-1}^H / \sigma_B$	0,30 / 125	0,26 / 108	0,24 / 100
$K_\sigma = \sigma_{-1} / \sigma_{-1}^H$	1,22 / 88	1,34 / 97	1,38 / 100

\* Числитель и знаменатель – абсолютное и относительное (в %) значение характеристик соответственно (за 100 % принято значение характеристики для ЧШГ)

Исследовали свойства ЧВГ во всем диапазоне степеней сфероидизации графита, характерных для этого материала – от 40 до 70 % (с точностью  $\pm 5$  %). Для этого исходный нелегированный чугун обрабатывали переменным количеством комплексной лигатуры на основе кремния и железа, заливали клиновидные пробы, в которых ЧВГ имел феррито-перлитную структуру. Из проб вырезали образцы для определения основных физико-механических характеристик, которые определяют работоспособность блоков цилиндров: предела прочности ( $\sigma_B$ ), относительного удлинения ( $\delta$ ), твердости (НВ), ударной вязкости (КС), циклической вязкости ( $\delta_c$ ), модуля упругости (Е) и температуропроводности ( $\alpha$ ). Средние результаты испытаний образцов приведены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что при изменении формы включений графита даже в указанных пределах представляется возможным регулировать уровень каждой характеристики ЧВГ – особенно по циклической вязкости в 3,2 раза, относительному удлинению – 2,5, ударной вязкости – 2,5, по температуропроводности – 1,5; предел прочности, твердости и модуль упругости увеличились в среднем лишь на 20 %. Полученные результаты позволяют судить о чувствительности изученных физико-механических свойств к форме графита и учитывать это при назначении оптимальной технологии производства конкретных отливок из чугуна с вермикулярным графитом.

Для гарантированного достижения прогнозируемой формы графитовых включений в структуре ЧВГ конкретных отливок необходимо соблюдать жесткие условия по содержанию серы в исходном чугуне, температуре и условиям модифицирующей обработки расплава, длительности выдержки последнего в жидком состоянии. Результаты стабилизируются при использовании низкомагниевого комплексных лигатур на основе кремния и железа с кальцием и РЗМ. При этом оптимальная концентрация этих элементов

определяется требованиями к структуре чугуна в отливках и, например, для получения тонкостенных (толщина 5-15 мм) отливок из ЧВГ с бескарбидной (феррито-перлитной) структурой, характерной для деталей картеров двигателей, находится в пределах, %: 1-2 Mg, 2-4 РЗМ, 1-3 Са [8]. Такие лигатуры эффективны и рациональны только при низком (на уровне 0,01 %) содержании серы в исходном чугуне.

В случае нерафинированных шихтовых материалов (с содержанием серы до 0,05 %) при производстве литья из ЧВГ широко используются лигатуры со сфероидизирующими (магний, церий) и десфероидизирующими (титан, алюминий) элементами. При этом значительно расширяется интервал остаточного содержания в модифицированном чугуне магния, при котором формируется компактный графит и, таким образом, повышается надежность технологии производства ЧВГ.

Исследовали структуру и физико-механические свойства чугуна, обработанного переменным количеством лигатуры марки КМг5 (ДСТУ 3362-96) в смеси с ферротитаном марки ФТи65 (ГОСТ 4761-80). Для получения качественных зависимостей формы графитовых включений (ССГ), твердости, предела прочности при растяжении и относительного удлинения модифицированного чугуна провели серию экспериментов с различной концентрацией (%) в металле титана (0,018-0,160), магния (0,012-0,048) и хрома (0,04-0,46) при неизменном содержании (%) углерода (3,6-3,8), кремния (2,45-2,58), марганца (0,45-0,55), никеля (0,10-0,14) и меди (0,25-0,30).

Полученные результаты обработали на ЭВМ и построили уравнения регрессии:

$$ССГ = 34,01 - 214,65 \cdot Ti + 2406 \cdot Mg + 464,18 \cdot Ti^2 - 17598 \cdot Mg^2, \%; R = 0,982;$$

$$НВ = 181,54 + 97,83 \cdot Cr + 8466,3 \cdot Cr \cdot Mg - 546,11 \cdot Ti^2 - 280,61 \cdot Cr^3, МПа; R = 0,970;$$

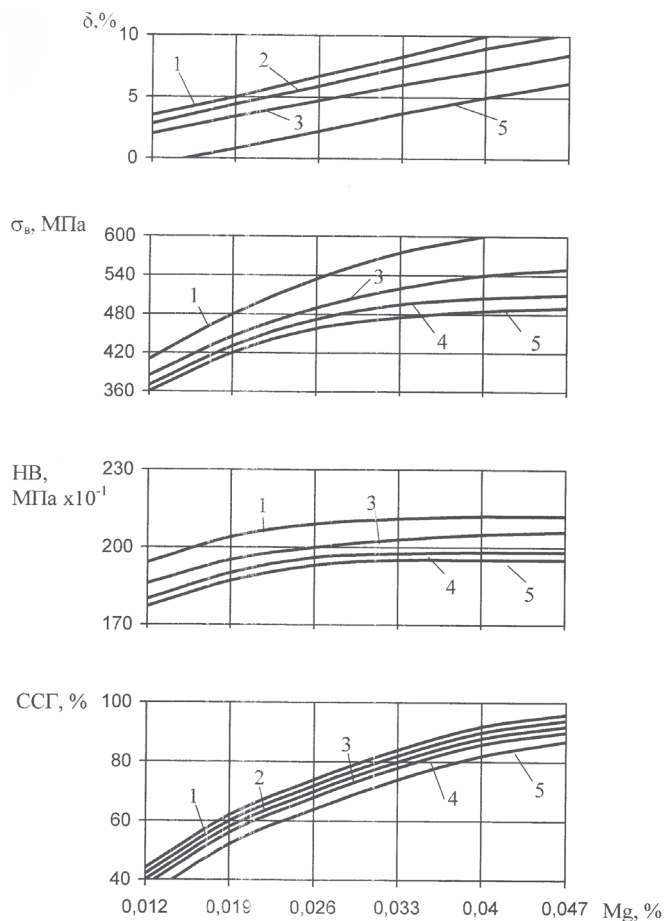
$$\sigma_B = 258,3 + 14291 \cdot Mg - 20934 \cdot Mg \cdot Ti - 140480 \cdot Mg^2, МПа; R = 0,979;$$

$$\delta = 12,62 - 298,77 \cdot Ti + 222,72 \cdot Mg + 1368,6 \cdot Ti^2, \%; R = 0,433.$$

(R – множественный коэффициент корреляции; Ti,

Таблица 3  
Физико-механические свойства чугуна с молекулярным графитом

ССГ, %	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	НВ, МПа, $\times 10^{-1}$	КС, кДж/м <sup>2</sup>	$\delta_c$ , %	Е, МПа, $\times 10^{-2}$	$\alpha$ , м <sup>2</sup> /с, $\times 10^6$
40	365	1,8	160	190	8,5	137	38
50	400	2,2	175	210	5,5	141	33
60	430	2,8	178	315	3,6	152	30
70	450	4,5	185	470	2,7	166	25



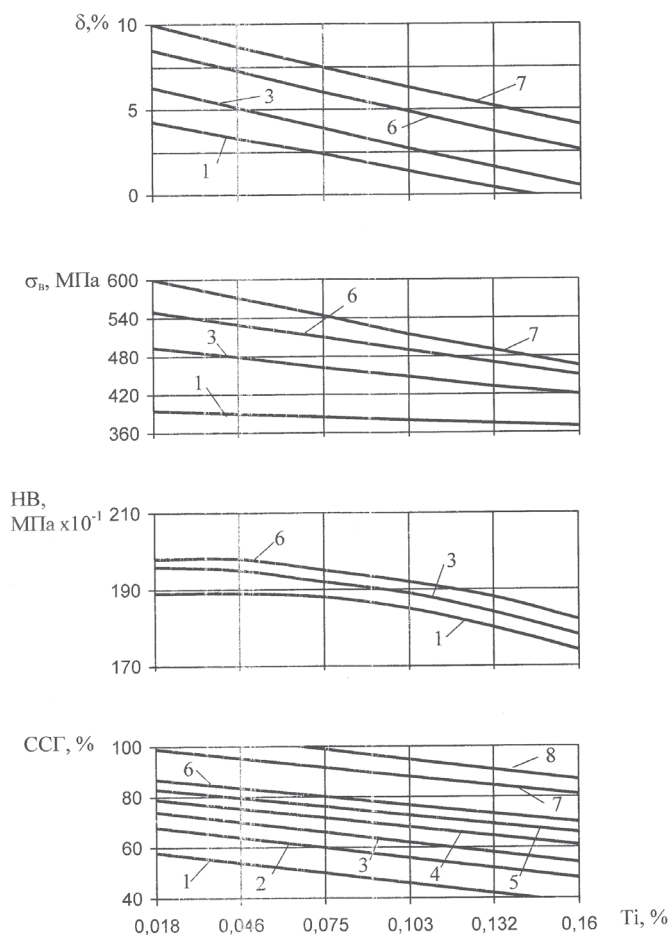
**Рис. 1.** Влияние остаточного содержания магния на структуру и свойства чугуна с содержанием титана, %: 1 – 0,02; 2 – 0,06; 3 – 0,09; 4 – 0,13; 5 – 0,16

Mg, Сг – содержание элементов в чугуне, %).

Анализ графических зависимостей, построенных по этим моделям для чугуна с 0,04 % хрома (рис. 1 и 2), показывает, что характер влияния остаточного содержания магния на изученные характеристики определяется массовой долей титана в чугуне: увеличение ее с 0,02 до 0,10 и 0,16 % позволяет для получения ЧВГ (ССГ до 70 %) поднять верхний допустимый уровень содержания магния с 0,022 до 0,028 и 0,032 % соответственно. При этом из-за десфероидизирующего действия титана понижается твердость чугуна. Нарастающий ввод в расплав титана в указанных пределах, обеспечивая возможность формирования вермикулярного графита при более высокой концентрации магния, сужает интервал значений предела прочности при растяжении чугуна (с 400-550 МПа при 0,02 % Ti до 380-490 МПа при 0,10 % Ti и до 350-450 МПа при 0,16 % Ti), благодаря чему значительно выравнивается качество металла в отливках.

### Выводы

1. Всесторонний сравнительный анализ литейных, физико-механических и эксплуатационных свойств основных типов чугунов (с графитом

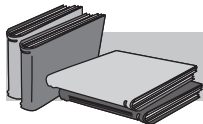


**Рис. 2.** Влияние содержания титана на структуру и свойства чугуна с остаточным содержанием магния, %: 1 – 0,012; 2 – 0,018; 3 – 0,021; 4 – 0,024; 5 – 0,027; 6 – 0,030; 7 – 0,040; 8 – 0,048

пластинчатым, вермикулярным, шаровидным) и опыта эксплуатации показал, что для блоков цилиндров дизельных двигателей наиболее приемлемым является чугун с вермикулярным графитом, обладающий: по сравнению с серым чугуном различных марок – большим уровнем показателей прочности, пластичности, упругости, меньшей твердостью; по сравнению с чугуном с шаровидным графитом – меньшей объемной усадкой, большими температуропроводностью и демпфирующей способностью (циклической вязкостью), меньшей твердостью.

2. Исследованы показатели статической и динамической прочности, текучести, упругости, ударной и циклической вязкости, температуропроводности чугунов с различной структурой включений графита и определены уровни изученных свойств, характерных для чугуна с вермикулярным графитом.

3. Приведены результаты экспериментальных исследований титано-магниевого процесса получения отливок из чугуна с вермикулярным графитом и определены оптимальные концентрации основных элементов для стабилизации процесса.



# ЛИТЕРАТУРА

1. Чугун: Справочник / Под ред. А. Д. Шермана, А. А. Жукова. – М.: Металлургия, 1991.
2. Отечественный и зарубежный опыт применения чугунов для деталей тракторных дизелей / В. И. Канторович и др. – М.: Изд-во ЦНИИТЭИТракторосельхозмаш, 1990.
3. Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки. Гост 1412-85.
4. Литовка В. И. Повышение качества высокопрочного чугуна в отливках. – Киев: Наук. думка, 1987.
5. Литовка В. И. Высокопрочный чугун с вермикулярным графитом: получение, свойства, применение. – Киев: Знание, 1984.
6. Бех Н. И., Литовка В. И. Чугун с вермикулярным графитом для корпусных деталей двигателей // Автомобильная пром-сть. – 1985. – № 4.
7. Бех Н. И. Исследования и разработка процесса получения отливок из высокопрочного чугуна на АО КамАЗ: Дисс. ... к. т. н. – Санкт-Петербург: СПГТУ, 1992.
8. Ткачук И. В. Получение тонкостенных отливок из чугуна с вермикулярным графитом: Дисс. ... к. т. н. – Киев: ИПЛ НАНУ, 1996.

## Summary

O. I. Shinsky, V. I. Litovka, N. I. Tarasevich, S. I. Klimenko, N. J. Tereshenko, O. O. Tokareva

### Rationale for selecting the type of cast iron cylinder block castings for diesel engines

A comparative analysis of casting, physical, mechanical and operational properties of the main types of cast iron - with a graphite plate, compact (flake), nodular. We study static, dynamic, damping and other characteristics of irons with the structure of graphite inclusions, characteristic of cast iron with flake graphite. The results of experiments on stabilization of the structure and properties of cast iron castings

## Анотація

О. Й. Шинський, В. І. Литовка, М. І. Тарасевич, Н. Я. Терещенко, О. О. Токарева

### Обґрунтування вибору типу чавуну для відливок блоків циліндрів дизельних двигунів

Виконано порівняльний аналіз ливарних фізико-механічних та експлуатаційних властивостей головних типів чавунів – із пластинчастим, компактним (вермикулярним), кулястим графітом. Досліджено статичні, динамічні, демпфуючі та інші характеристики чавунів із структурою графітових включень, яка характерна для чавуну з вермикулярним графітом. Приведено результати експериментів за стабілізацією структури та властивостей чавуну в відливках

## Ключевые слова

Типы чугунов, графит пластинчатый, графит компактный (вермикулярный), графит шаровидный, графитовые включения, отливки

## Вниманию авторов!

С 2009 г. в соответствии с требованиями ВАКа все статьи, поступающие в редакции научных журналов, должны обязательно проходить рецензирование, иметь ключевые слова на русском и аннотации на русском, украинском и английском языках. Объем статьи – не более 10 страниц, рисунков – не более 5.

Статьи в редакции должны поступать в распечатанном виде и на электронных носителях. Для текстовых материалов желательно использовать формат **doc**. Для графических материалов – формат **jpeg**. Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах. Фотографии, рисунки, графики и чертежи должны быть черно-белыми, четкими и контрастными.