

СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БАЗОВЫХ ДЕТАЛЕЙ МОЩНЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*В.В. Андреев, д.т.н., вед. н. с.
ОАО НПО «Центральный научно-исследовательский институт
технологии машиностроения» (ЦНИИТМАШ)*

Рассмотрены прочностные и основные эксплуатационные характеристики высокопрочного чугуна с вермикулярным графитом и эффективные технологии изготовления из этого конструкционного материала базовых деталей мощных дизельных двигателей. На примерах изготовления реальных отливок показаны перспективы производства дизельных двигателей с использованием современных материалов и инновационных технологий, обеспечивающих высокие технические характеристики, эксплуатационную надежность и конкурентоспособность выпускаемых силовых агрегатов.

Министерство торговли и промышленности России провело открытый конкурс на право заключения государственных контрактов на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по федеральной целевой программе «Национальная технологическая база» на 2007–2011 годы по подпрограмме «Создание и организация производства в Российской Федерации в 2011–2015 годах дизельных двигателей и компонентов нового поколения».

В этой связи проблема повышения моторесурса и надежности существующих типов мощных дизельных двигателей, а также новых и перспективных конструкций требуют и существенного повышения физико-механических характеристик материалов, используемых для их изготовления. Кроме того, как в новых, так и в существующих двигателях имеется целый ряд чугунных базовых деталей, испытывающих в процессе эксплуатации не только большие статические, но и динамические и термоциклические нагрузки и определяющие ресурс силового агрегата. Это корпуса турбокомпрессоров, крышки и блоки цилиндров, втулки цилиндров и цельнолитые поршни. К материалу этих деталей предъявляются следующие основные требования: повышенная прочность, высокая теплопроводность и хорошие литейные свойства, обеспечивающие получение качественных (без усадочных дефектов) отливок сложной конфигурации.

Этим требованиям традиционно применяемый чугун с пластинчатым графитом, несмотря на легирование, уже не может соответствовать и обеспечивать необходимый уровень служебных характеристик деталей. При их изготовлении из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, из-за его низкой теплопроводности в процессе эксплуатации в условиях высокого градиента температур по толщине стенки отливки возникают и накапливаются опасные термические напряжения и деформации, которые нередко приводят к преждевременному усталостному разрушению деталей. Кроме того, из-за повышенной объемной усадки и более высокой склонности к образованию усадочных дефектов этого чугуна трудно, а в ряде случаев невозможно обеспечить хорошее качество сложных, фасонных и малотехнологичных отливок.

Разработанные в ЦНИИТМАШ высокопрочные чугуны с шаровидным и вермикулярным графитом по своим техническим характеристикам остаются и в XXI веке перспективными конструкционными материалами для широкой номенклатуры ответственных отливок в машиностроении. При этом высокопрочный чугун со своеобразной «вермикулярной» формой графита сочетает высокие прочностные и теплофизические свойства, благодаря чему он относится к наиболее перспективным конструкционным материалам для литых деталей мощных дизельных двигателей, работающих в условиях переменных повышенных температур и больших термоциклических и механических нагрузок.

Технология обработки исходного расплава редкоземельными металлами (РЗМ), разработанная в ЦНИИТМАШ, обеспечивает стабильное формирование графита вермикулярной формы и воспроизводимые свойства чугуна в широком диапазоне толщин стенок (30–150 мм) машиностроительных отливок. При этом редкоземельные металлы используются в виде комплексных РЗМ-содержащих лигатур, позволяющих снизить стоимость модификатора, повысить степень усвоения редкоземельных элементов, а также

Таблица 1

Механические свойства чугунов с различной формы графита в литом состоянии

Марка чугуна	Структура		Механические свойства				
	Форма графита	Металлическая основа	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	НВ	σ_{-1} , МПа
СЧ 25	Пластинчатая	П100(Ф0)	305	—	—	215	100
ЧВГ30	Вермикулярная	П10(Ф90)	320	265	5,6	170	170
ЧВГ40	Вермикулярная	П60(Ф40)	430	350	3,2	197	210
ВЧ 50	Шаровидная	П60(Ф40)	560	415	7,8	187	245

Таблица 2

Механические свойства ЧВГ40 при повышенных температурах

Структура чугуна	Механические свойства	Температура испытаний, °С						
		20	350	400	450	500	550	600
Литая П60(Ф40)	σ_B , МПа	425	425	410	390	342	290	220
	δ , %	3,5	3,0	2,0	2,8	4,2	8,0	12,0
Ферритная П0(Ф100)	σ_B , МПа	395	390	380	370	320	270	210
	δ , %	5,0	4,0	3,0	4,5	6,0	10,0	14,0
Перлитная П90 (Ф10)	σ_B , МПа	490	485	480	439	400	315	240
	δ , %	2,6	2,0	1,8	1,2	1,5	3,2	7,0

обеспечить экологическую безопасность технологического процесса.

Для получения графита вермикулярной формы необходимо иметь в чугуне определенное остаточное содержание РЗМ. При этом прочностные свойства чугунов с вермикулярным графитом зависят от соотношения в структуре количества вермикулярного и шаровидного графита и от остаточного содержания редкоземельных металлов. Требуемое количество РЗМ для обработки исходного чугуна определяется содержанием серы и температурой расплава. Выявленные зависимости позволили разработать базовую технологию изготовления отливок из чугуна с вермикулярным графитом и преимущественно ферритной металлической основой марок ЧВГ35 и ЧВГ40 (ГОСТ 28394–89) при обработке исходного расплава РЗМ-содержащей лигатурой и графитизирующем модифицировании 75 %-ным ферросилицием [1].

Математический анализ экспериментальных данных позволил выявить оптимальный состав, обеспечивающий при вермикулярной форме графита наиболее высокие физико-механические и хорошие литейные свойства, а также минимальную склонность чугуна к усадке и отбелу в тонких сечениях отливок. Этот состав соответствует содержанию элементов: 3,5–3,6% С; 2,4–2,6% Si; 0,6–0,8% Mn; 0,02–0,06% P и 0,010–0,15% РЗМ.

В целом механические свойства чугуна с вермикулярным графитом (до 30 % шаровидного) в литом состоянии имеют следующие значения:

Для сравнения в табл. 1 приведены механические свойства, в том числе и циклическая

временное сопротивление разрыву при растяжении σ_B , МПа	320–400
условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	270–360
относительное удлинение δ , %	2–8
твердость, НВ	143–220
циклическая (усталостная) прочность σ_{-1} , МПа	170–210
ударная вязкость КС, Дж/см ² (без надреза)	20–30

(усталостная) прочность (σ_{-1}) нелегированных чугунов с разной формой графита в литом состоянии. Как видим, у чугунов с вермикулярным графитом предел усталости существенно превышает эту же характеристику чугуна с пластинчатым графитом и близкий по своим значениям к усталостной прочности нелегированного чугуна с шаровидным графитом.

В табл. 2 приведены результаты испытаний механических свойств чугуна с вермикулярным графитом марки ЧВГ40 в интервале температур 20–600 °С в литом состоянии, а также с ферритной

и преимущественно перлитной металлической основой, полученных соответственно после отжига на феррит и нормализации этого чугуна.

Чугун с вермикулярным графитом с повышением температуры до 450–500 °С сохраняет достаточно высокую прочность. При более высоких (600 °С) температурах прочностные характеристики чугуна резко падают.

Для решения проблемы повышения конструкционной прочности и эксплуатационной надежности базовых корпусных деталей (корпусов турбокомпрессоров, головок и блоков цилиндров) дизельных двигателей применили новый литейный конструкционный материал — чугун с вермикулярным графитом.

В условиях литейного производства Коломенского, Пензенского дизельного и Уральского дизель-моторного заводов были изготовлены опытно-промышленные партии корпусных деталей из чугуна с вермикулярным графитом марки ЧВГ35 взамен серийных, в том числе низколегированных СЧ-ХНМГ и ЖЧХ1, чугунов с пластинчатым графитом (рис. 1 и 2).

Термоциклические испытания этих деталей на экспериментальных стендах и работа на серийных дизелях показали более высокую (в 2,5–3 раза) эксплуатационную стойкость и конструк-

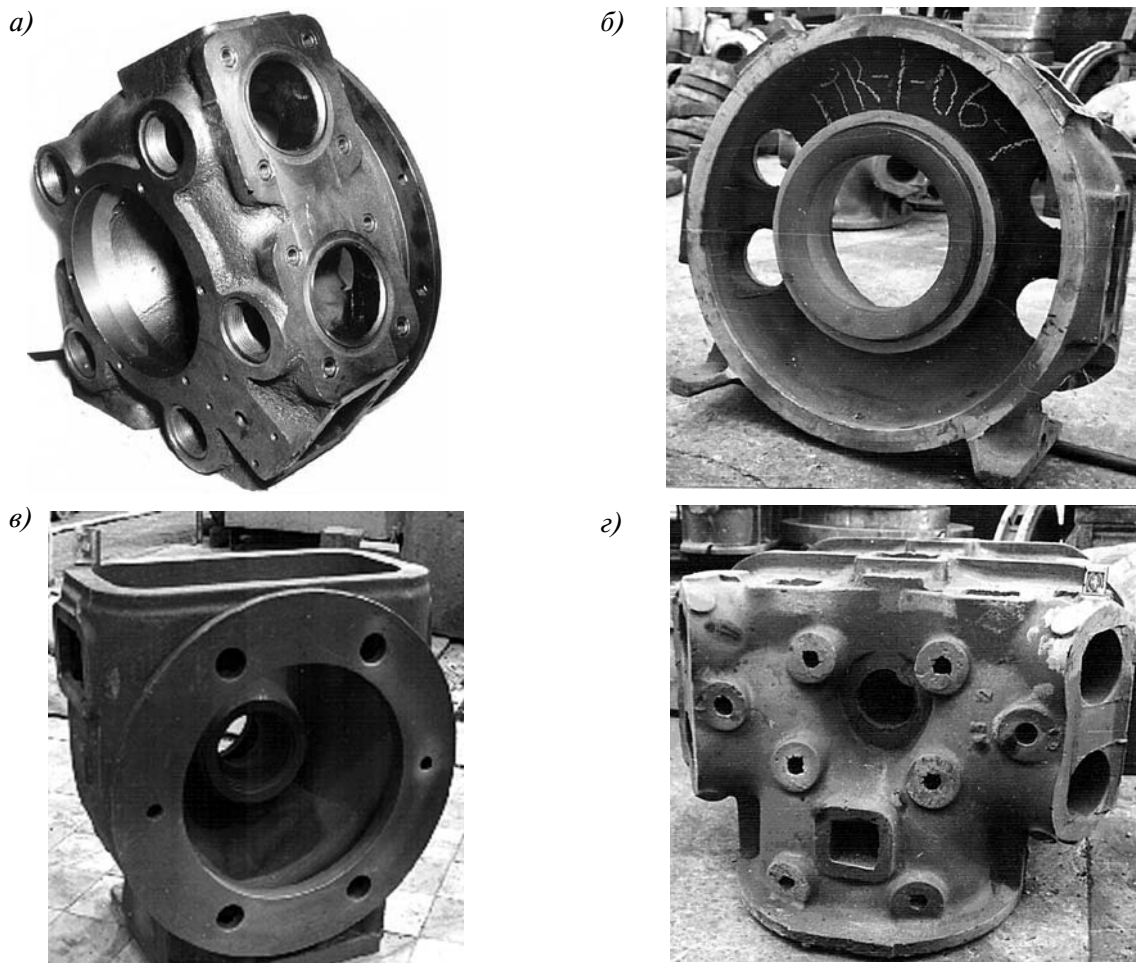


Рис. 1. Корпуса турбокомпрессоров из ЧВГ35.
 Масса отливок, кг: *a* — 115; *б* — 190; *в* — 350; *г* — 650

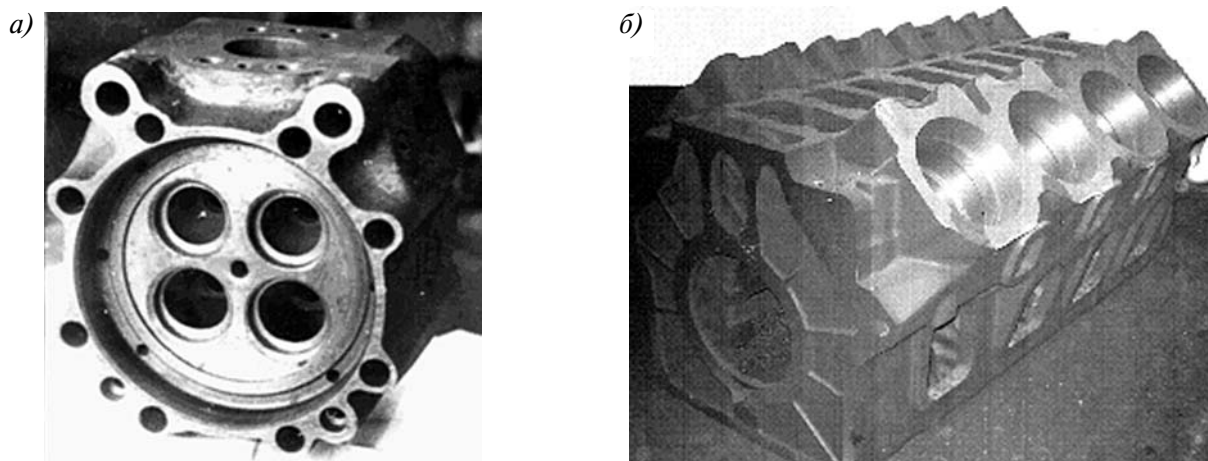


Рис. 2. Головка (а) и блок цилиндров (б) из ЧВГ35
 8-цилиндрового дизеля ДМ21 (масса отливок соответственно 35 и 2500 кг)

ционную надежность деталей из ЧВГ при пиковых нагрузках.

Применительно к деталям цилиндропоршневой группы дизелей (цилиндровых втулок и цельнолитых поршней), работающих в условиях интенсивного износа, была разработана [2] новая технология получения низколегированного чугуна

с вермикулярным графитом и перлитной металлической основой марки ЧВГ-ХНМД. Для всесторонней оценки перспективы применения этого чугуна в качестве конструкционного материала для указанных деталей проведены сравнительные исследования литейных, прочностных и эксплуатационных характеристик новой марки чугуна и

традиционно применяемых в дизелестроении чугунов с пластинчатым и шаровидным графитом (табл. 3).

Перлитный чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ-ХНМД) по прочности, особенно при повышенных температурах, в 1,5 раза превосходит низколегированный чугун (СЧ-ХНМГ) с пластинчатым графитом и лишь немного уступает высокопрочному чугуну (ВЧ-МД) с шаровидным графитом.

ЧВГ-ХНМД в сравнении с СЧ-ХНМГ имеет более высокие (на 30–60 %) значения усталостной и длительной прочности в интервале температур 300–500 °С. При этом перлитный чугун с вермикулярным графитом обладает хорошей жидкотекучестью и по сравнению с высокопрочным чугуном (ВЧ-МД) имеет в 2 раза меньшую склонность к образованию усадочных дефектов. Эти показатели сохраняют технологические преимущества чугуна с вермикулярным графитом и облегчают изготовление качественных отливок без усадочных раковин и пористости.

Исследования износостойкости и антифрикционных свойств чугунов показали, что по износостойкости и антифрикционным свойствам перлитный чугун с вермикулярным графитом не уступает серийному чугуну с пластинчатым графитом, широко применяемому в качестве материала для цилиндрических втулок большинства дизелей.

В условиях Коломенского завода были изготовлены для стендовых и эксплуатационных

испытаний втулки цилиндров из перлитного ЧВГ-ХНМД для дизеля размерностью 23/30 (рис. 3, а). Эксплуатационные испытания втулки проходили на 12-цилиндровом дизеле 14Д40 мощностью 2000 л. с., работающем на грузовом тепловозе 2М62 в депо Вильнюс. После пробега 150 тыс. км (наработка дизеля около 7000 ч) тепловоз был поставлен на плановый текущий ремонт ТР-3 в локомотивном депо Даугавпилс. В процессе ремонта были демонтированы, тщательно осмотрены и обмерены все цилиндрические втулки.

Втулки из ЧВГ-ХНМД каких-либо трещин или разрушений не имели. Состояние рабочей поверхности (зеркала) было хорошее, без задиоров, «натиров» и «наяснений». Микрорельеф от фосфатирования сохранился полностью. Перемычки между продувочными окнами не были изношены.

Износ рабочей поверхности (менее 25 мкм) не превысил нормы для серийного чугуна. Опытные втулки по сравнению с серийными показали более высокую износостойкость и сопротивляемость возникновению усталостных трещин. Поршни и поршневые кольца, работавшие в паре со втулками из ЧВГ-ХНМД, изнашивались меньше, чем эти же детали, работавшие в паре со втулками из серийного чугуна.

Втулки из ЧВГ-ХНМД были вновь поставлены на двигатель для дальнейшей эксплуатации. После ремонта тепловоз еще совершил пробег ≈ 250 тыс. км (наработка дизеля более 15 000 ч). Замечаний по работе этих втулок в процессе эксплуатации не было.

В условиях Уральского дизель-моторного завода освоили новую технологию от-

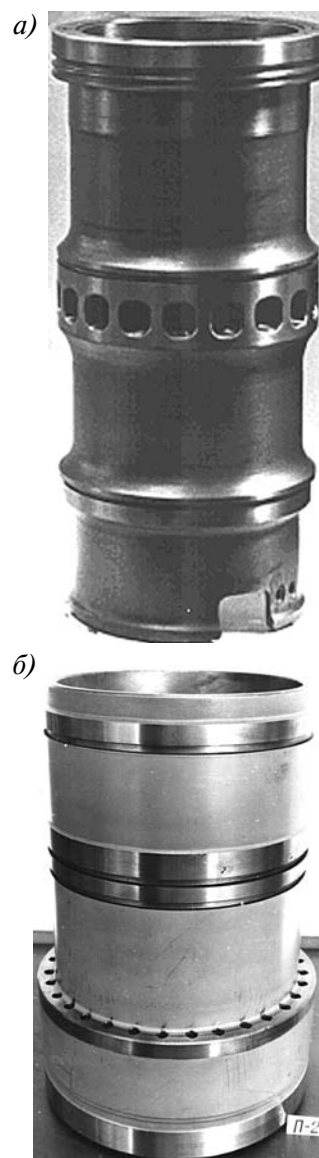


Рис. 3. Втулки (гильзы) цилиндров из ЧВГ-ХНМД для дизелей размерностью 23/30 (а) и 21/21 (б)

Таблица 3

Физико-механические свойства чугунов с различной формой графита

Тип чугуна и свойства	Температура испытаний, °С			
	20	300	400	500
СЧ-ХНМГ				
σ _в , МПа	370	360	330	275
σ ₋₁ , МПа	120	—	—	—
E·10 ⁴ , МПа	13,2	12,5	12,1	10,4
α·10 ⁻⁶ , 1/°С	13,8	14,3	15,2	14,7
λ, Вт/м·с·К	49,5	42,5	41,0	40,5
ЧВГ-ХНМД				
σ _в , МПа	550	525	490	390
σ ₋₁ , МПа	177	162	153	122
E·10 ⁴ , МПа	17,6	16,3	15,7	15,0
α·10 ⁻⁶ , 1/°С	14,2	14,7	15,9	15,9
λ, Вт/м·с·К	44,0	37,5	36,5	36,0
ВЧ-МД				
σ _в , МПа	580	560	510	435
σ ₋₁ , МПа	162	—	—	—
E·10 ⁴ , МПа	17,7	16,4	15,8	15,2
α·10 ⁻⁶ , 1/°С	14,0	14,4	16,9	16,9
λ, Вт/м·с·К	31,0	29,5	29,0	28,5

ливки заготовок втулок цилиндров (рис. 3, б) дизелей ДМ21 из перлитного чугуна с вермикулярным графитом ЧВГ-ХНМД методом центробежного литья на специализированном участке во вращающихся разовых песчано-глинистых формах.

Безаварийная эксплуатация этих втулок на дизелях, установленных на большегрузных самосвалах БелАЗ, подтвердила преимущества нового материала, обеспечивающего повышение конструкционной прочности деталей. Применение деталей из чугуна с вермикулярным графитом позволило организовать на заводе выпуск форсированных дизелей типа с увеличенной в 1,5 раза цилиндровой мощностью.

Таким образом, проведенный в ЦНИИТМАШ комплекс исследований по разработке и освоению технологий изготовления деталей дизелей из

чугунов с вермикулярной формой графита позволил создать научный и технологический задел для производства дизельных двигателей с использованием самых современных материалов и инновационных технологий, обеспечивающих высокие технические характеристики, эксплуатационную надежность и конкурентоспособность

Литература

1. *Андреев В.В.* Технология и перспективы производства отливок из чугуна с вермикулярным графитом // *Металлургия машиностроения*. — 2004. — № 3. — С. 26–33.

2. *Андреев В.В.* Перлитный чугун с вермикулярным графитом — перспективный конструкционный материал для литых деталей цилиндро-поршневой группы дизельных двигателей // *Литейщик России*. — 2010. — № 12. — С. 29–35.

КОНФЕРЕНЦИЯ

**18–21 сентября 2012 г. в Санкт-Петербурге в здании Академии наук
в рамках деловой программы
12-го Петербургского международного энергетического форума
будет проходить VII Международная научно-практическая конференция
«НОВЫЕ ГОРЮЧИЕ И СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ПРИСАДКАМИ»**

На конференции будут обсуждены практические вопросы производства новых и альтернативных топлив и смазочных материалов, совершенствования их путем введения присадок и добавок, в том числе из возобновляемого сырья, технологии регенерации отработанных смазочных материалов, производства и применения присадок и их влияния на экологию ГСМ и состав отработавших газов энергетических установок внутреннего и внешнего сгорания, а также улучшения экологического состояния мегаполисов, в том числе и Санкт-Петербурга.

Организаторы конференции

Санкт-Петербургский Научный Центр РАН; Северо-Западное отделение Научного Совета РАН по горению и взрыву; ПО «Кириши-нефтеоргсинтез»; ВНИИ НП; Совет главных

механиков предприятий нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности; Ассоциация нефтепереработчиков и нефтехимиков; РНЦ «Прикладная химия»; НАМИ-ХИМ; НАТИ; ВНИИНефтехим; журнал «Двигателестроение», СПбГАУ; Международная Академия Прикладных Исследований.

На конференции будут работать четыре секции

Производство и применение современных топлив.

Производство и применение современных смазочных материалов.

Производство и применение присадок, улучшающих эксплуатационные характеристики горючих и смазочных материалов.

Экологические проблемы применения ГСМ при эксплуатации энергетических установок.

Информация и приглашение на сайте WWW.APRIS.RU