

К настоящему времени на станы «2000» и «2500» ОАО «ММК» поставлено около 2000 листопрокатных валков (рис. 2), полученных методом центробежного литья, и более 1000 сортопрокатных валков (рис. 3) для сортопрокатных станков «170», «370» и «450», полностью обеспечив их отечественными валками.

Эксплуатационная стойкость листопрокатных валков, полученных по новой технологии, в 2,0–3,0 раза выше стойкости стационарно-литых валков и на 10–15% выше стойкости валков зарубежного производства, что позволило комбинату полностью отказаться от импортных валков таких известных производителей, как «Гонтерман Пайперс» (Германия), «Акерс» (Франция), и заменить их отечественными.

Эксплуатационная стойкость центробежно-литых сортопрокатных валков возросла на 3,0–3,5 раза по сравнению со стационарно-литыми валками.

Композитные валки, полученные методом центробежного литья, пользуются успехом и на ряде отечественных металлургических комбинатов, таких как ОАО «НЛМК», «Северсталь», Омутнинском, Азов-

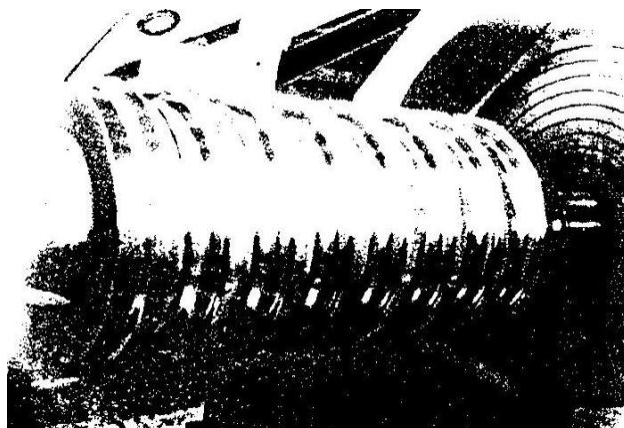


Рис. 3. Сортопрокатный валок  $\varnothing 500 \times 2000$  мм, полученный методом центробежного литья

сталь, Чусовском и ряда других, что свидетельствует о высокой конкурентоспособности этой продукции.

Список литературы

1. Кривошеев А.Е. Литье валки. М.: Металлургиздат, 1957. 360 с.
2. Заявка 2007114631/02 от 18.04.2007.
3. Заявка 2007139267 от 24.10.2007.
4. Заявка 2007146603 от 18.12.2007.
5. Куманин И.Б. Вопросы теории литейных процессов. М., 1960. С. 482–531.
6. Заявка 2007124353/02 от 29.07.2007 г.

List of literature

1. Krivosheev A.E. Casting rollers. M.: Metallurgizdat, 1957. P. 360.
2. Request 2007114631/02 dated 18.04.2007.
3. Request 2007139267 dated 24.10.2007.
4. Request 2007146603 dated 18.12.2007.
5. Kumin I.B. The theoretical questions of the casting processes. M., 1960. P. 482–531.
6. Request 2007124353/02 dated 29.07.2007.

УДК 621.74:669.13

Андреев В.В.

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗ ЧУГУНОВ С ВЕРМИКУЛЯРНЫМ ГРАФИТОМ ОТЛИВОК С ВЫСОКИМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Чугун со своеобразной, так называемой «вермикулярной», формой графита (рис. 1) относится к классу высокопрочных. Этот чугун обладает рядом специфических свойств, которые выдвигают его в число перспективных конструкционных материалов для отливок самого различного назначения.

По своим литейным и физико-механическим свойствам чугун с вермикулярным графитом может быть успешно использован взамен серого чугуна с пластинчатым графитом для ряда ответственных деталей общего машиностроения, к материалу которых по условиям их работы предъявляются повышенные требования по прочностным и пластическим характеристикам. Свойственное же этому чугуну сочетание высоких показателей механических свойств и повышенной теплопроводности делает особенно перспективным его применение для деталей, работающих в условиях больших механических нагрузок и значительного перепада температур, а именно:

– в дизелестроении для деталей цилиндропоршневой группы мощных (600–1500 л.с.) форсированных

дизельных двигателей (блоки и крышки цилиндров, цилиндрические втулки и корпуса турбокомпрессоров), надежно работающих при высоких механических и термодинамических нагрузках, а также позволяющих увеличить минимум в 1,5 раза мощность двигателей при тех же конструктивных параметрах;

– в производстве крупногабаритных отливок кокильной и металлургической оснастки с повышенной эксплуатационной стойкостью.

Отечественным стандартом (ГОСТ 28394-89) предусмотрены четыре марки чугуна с вермикулярным графитом (табл. 1) с ферритной ЧВГ30 и ЧВГ35, ферритно-перлитной ЧВГ40 и перлитной ЧВГ45 металлической основой.

При получении чугуна с вермикулярным графитом (ЧВГ) обычно используют следующие четыре варианта обработки исходного расплава [1]:

- обработка магнием с введением его меньше, чем необходимо для полной сфероидизации графита;
- обработка одновременно магнием и десферодирующим элементом (обычно титаном);

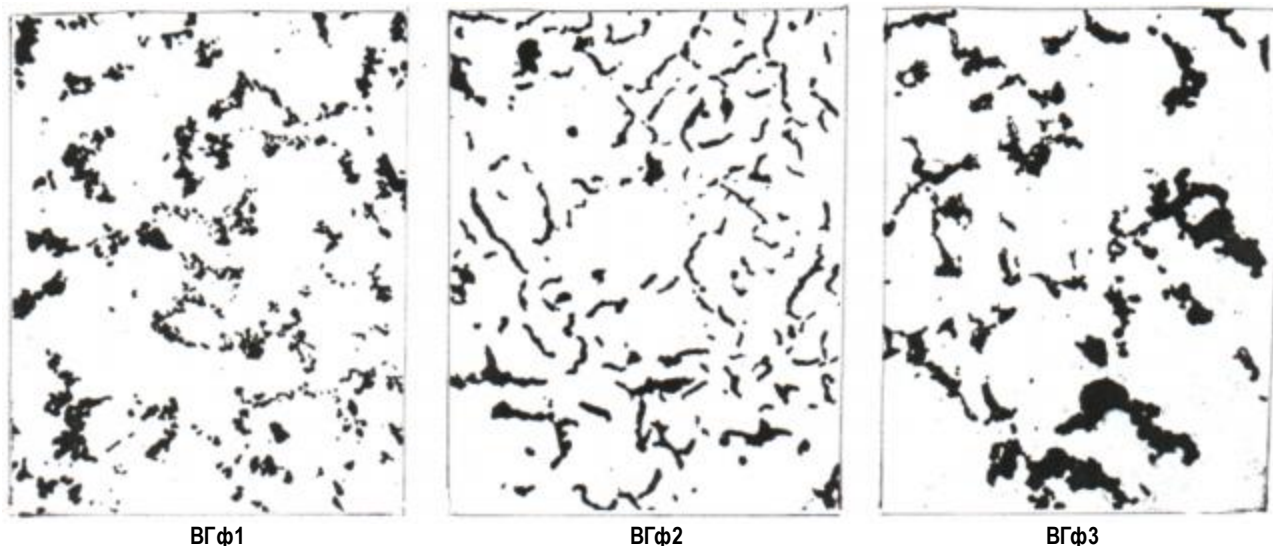


Рис. 1. Вермикулярная форма графита в чугуне (ГОСТ 3443-85), ×100

- сфероидизирующая обработка магнием и по ее результатам в зависимости от полученной формы графита в пробе осуществляется либо добавка десфероидизатора (при получении преимущественно шаровидного графита), либо дополнительное введение сфероидизатора (в случае получения преимущественно пластинчатого графита);
- обработка редкоземельными металлами.

Наиболее надежными и простыми с технологической точки зрения, обеспечивающими стабильное получение вермикулярной формы графита и хорошие санитарно-гигиенические условия процесса модифицирования, являются способы, основанные на использовании РЗМ. Одним из них, получившим практическое применение при изготовлении из чугуна с вермикулярным графитом отливок сельскохозяйственных машин [2] и крышек цилиндров дизельных двигателей [3], является технология обработки предварительно десульфурованного ( $S_{исх} < 0,01\%$ ) чугуна цериевым мишметаллом (92–95% РЗМ, в том числе 40–45% Се).

Однако использование РЗМ в виде мишметалла или чистых индивидуальных редкоземельных элементов (Се, Y, La) для получения стабильных результатов требует, как правило, предварительного глубокого рафинирования исходного чугуна, а также соблюдения особых мер безопасности при подготовке и хранении этих сплавов. Более рационально использовать

сплавы РЗМ-Si (табл. 2), позволяющие повысить степень усвоения РЗМ жидким чугуном и снизить стоимость модифицирования.

Обработка чугуна такими сплавами не требует применения каких-либо специальных методов их ввода в расплав, процесс модифицирования протекает спокойно и обеспечивает экологическую безопасность окружающей среды. С использованием этих лигатур разработаны и освоены на отечественных предприятиях технологические процессы изготовления из чугунов с вермикулярным графитом отливок самого различного назначения, в частности в ОАО «Турбомоторный завод» (г. Екатеринбург) деталей цилиндропоршневой группы мощных (600–1500 л.с.) форсированных дизельных двигателей типа ДМ (блоки и крышки цилиндров, цилиндрические втулки и корпуса турбокомпрессоров), надежно работающих при высоких механических и термоциклических нагрузках, а также позволяющих увеличить минимум в 1,5 раза мощность двигателей при тех же конструктивных параметрах (рис. 2).

Поиск новых вариантов составов модифицирующих присадок для получения чугуна с вермикулярным графитом продолжается и в настоящее время. Составы новых лигатур, предлагаемые для этих целей белорусскими исследователями [4] под маркой «Вермикуляр», фирмой «НПП Технология» (г. Челябинск, Россия) под маркой «Vermilou» и фирмой ELKEM (Норвегия) под маркой

Таблица 1

Механические свойства стандартных марок ЧВГ

Марка чугуна	Механические свойства			
	Временное сопротивление при растяжении $\sigma_B$ , МПа (кг/мм <sup>2</sup> )	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа (кг/мм <sup>2</sup> )	Относительное удлинение $\delta$ , %	Твердость по Бринеллю, НВ
ЧВГ 30	300 (30)	240 (24)	3,0	130–180
ЧВГ 35	350 (35)	260 (26)	2,0	140–190
ЧВГ 40	400 (40)	320 (32)	1,5	170–220
ЧВГ 45	450 (45)	380 (38)	0,8	190–250

Таблица 2

Составы РЗМ-содержащих лигатур (ТУ 14-15-136-81)

Марка	Содержание элементов*, масс. %			
	Сумма РЗМ	Кремний	Алюминий	
			Класс А	Класс Б
ФСЗОРЗМ30	30–40	30–50	2–5	5–15
ФСЗОРЗМ20	20–30	30–55	2–5	5–15
ФСЗОРЗМ15	15–20	30–60	2–5	5–15

\* Остальное железо.

«Lamet», «Remag» и «CompactMag» [5], в сравнении с традиционной «CG-лигатурой» [6] приведены в табл. 3.

Составы Mg-содержащих лигатур для получения чугуна с вермикулярным графитом

Комплексный модификатор Vermiloy (см. табл. 3) существенно удешевляет процесс обработки и модифицирования чугуна за счет частичной замены относительно дорогих РЗМ более дешевым магнием. При этом вермикулярная форма графита (до 20% шаровидного) и соответствующие механические свойства чугунов ( $\sigma_6=350-420$  МПа,  $\delta=2,5-4,5\%$ ) получены при содержании в металле 0,010–0,015%Mg и 0,04–0,08% РЗМ.

Тип лигатуры	Химический состав, масс. %						
	Mg	РЗМ	Ti	Ca	Al	Si	Fe
CG-лигатура	4,0–5,0	(Ce)0,2–0,35	8,5–10,5	4,0–5,5	1,0–1,5	48–52	Ост.
Вермикуляр 1	2,2–2,7	5,0–7,5	3,5–5,5	–	–	Ост.	20
Вермикуляр 2	3,0–3,5	4,5–7,5	1,0–2,5	–	–	Ост.	20
Vermiloy	4,5–5,0	3,7–4,5	–	0,7–1,2	1,0–1,5	48–52	Ост.
Vermiloy 2	4,5–5,3	0,4–0,7	8–10	0,5–1,0	До 1,5	45–50	«
Vermiloy 3	4,5–5,3	0,4–0,7	8–10	4,5–5,5	До 1,5	45–50	«
Vermiloy 4	2,7–3,3	6,5–7,4	3,5–4,5	0,8–1,2	2,0–4,0	45–48	«
Vermiloy 5	4,7–5,3	5,5–6,4	3,5–4,5	0,8–1,2	2,0–4,0	45–48	«
Lamet	5,0–6,0	(La)0,25–0,4	–	0,4–0,6	0,8–1,2	44–48	«
Remag	2,75–3,5	1,75–2,5	–	0,2–0,5	1,0 max	44–48	«
CompactMag	5,0–6,0	5,5–6,5	–	1,8–2,3	1,0 max	44–48	«

Из этого чугуна изготовлены отливки «блок цилиндров» дизеля (рис. 3) без структурно-свободного цементита в металлической основе во всем диапазоне толщин стенок от 10 до 80 мм.

Примечание. Модификаторы фирмы «НПП Технология» изготавливаются по оригинальной технологии, позволяющей получить более равномерное распределение активных элементов в структуре модификаторов, что, в свою очередь, приводит к лучшему усвоению и, как следствие, возможности уменьшения величины присадки.

На Чусовском металлургическом заводе для получения чугуна с вермикулярной формой графита успешно применяется обработка исходного ваграночного расплава микрокристаллическим модификатором Vermiloy. Сталеразливочные изложницы из этого нового материала имеют в 1,5 раза более высокую эксплуатационную стойкость в сравнении с изложницами из ваграночного чугуна с пластинчатым графитом.

Применение блоков цилиндров дизельных двигателей из ЧВГ обеспечило повышение на 35–40% мощности без увеличения массы силового агрегата [7].

Опыт производства отливок из чугуна с вермикулярным графитом на литейном заводе «КАМАЗ-металлургия» подтвердил преимущества модификатора Vermiloy. Обработка им жидкого чугуна сопровождается меньшим пироэффектом и дымовыделением в сравнении с использованием зарубежного модификатора CompactMag. Перевод ряда отливок (картера межосевого дифференциала, коробки переключения передач и др.) на изготовление из чугуна ЧВГ35 вместо ВЧ50 позволил сократить на 8–10% затраты на их производство.

Сравнивая предложенные составы лигатур, можно видеть, что в качестве альтернативы традиционной лигатуре, содержащей в основном Mg + Ti, предложены (Mg + РЗМ)-лигатуры без десфероидазирующего элемента с соотношением Mg:РЗМ=1,0–1,4, а также практически такие же лигатуры, но с Ti – десфероидазатором графита. При этом, например, лигатура Vermiloy 3 по химическому составу практически не отличается от CG-лигатуры.

Для обработки исходного расплава любыми, в том числе и предложенными, магнийсодержащими лигатурами необходимо использовать наиболее современ-

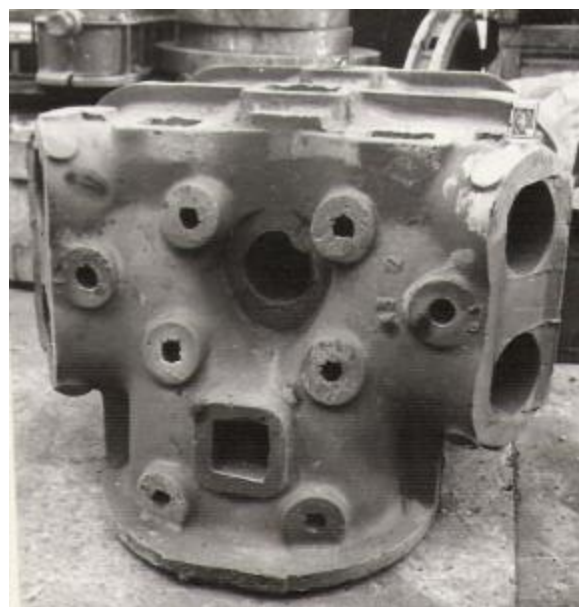
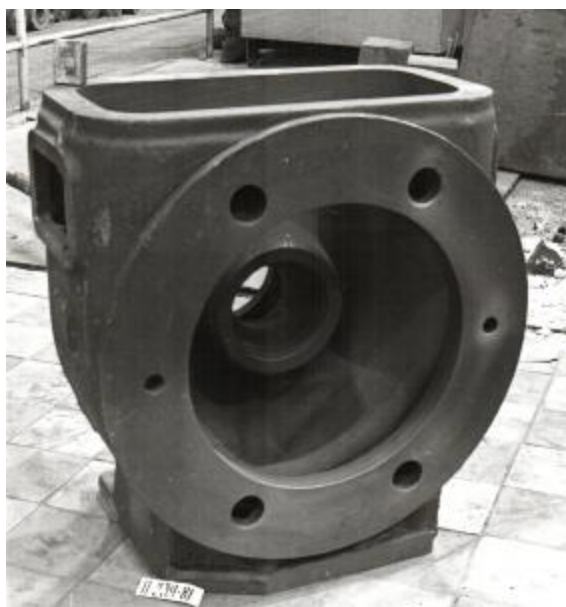


Рис. 2. Отливки корпусов турбокомпрессоров из ЧВГ (модифицирование сплавом РЗМ-кремний) для дизелей специального назначения

ные методы ввода присадок, например «сэндвич»-процесс в сочетании с мелкими (0,5–3,0 мм) фракциями модификатора.

Заданную вермикулярную форму графита в отливках обеспечивает технология обработки исходного расплава и модифицирования, включающая составы используемых присадок и параметры их ввода в жидкий чугун. Стабильность этих параметров и гарантирует получение необходимых структуры и свойств металла в отливках. При этом состав и количество вводимой лигатуры должны обеспечить получение в чугуне необходимых остаточных концентраций активных элементов и их определенное соотношение в металле, а соответственно и вермикулярную форму графита. К сожалению, систематических данных по остаточному содержанию тех или иных активных элементов в металле при производстве отливок из чугуна с вермикулярным графитом крайне мало и достаточно достоверными могут быть признаны лишь следующие. Для формирования вермикулярного графита необходимо иметь в чугуне:

- 0,015–0,025%Mg;
- 0,010–0,03%Mg + 0,05–0,30%Ti (десфероидизатора);
- 0,010–0,02% Mg + 0,04–0,08%PЗМ;
- 0,010–0,03% Mg + 0,01–0,05%PЗМ + 0,1–0,25%Ti;
- 0,03–0,06%Ce или 0,09–0,16%PЗМ;
- 0,02–0,04%Ce + 0,0005–0,0012%Bi.

Оценивая в целом современные технологические процессы получения чугуна с вермикулярной формой графита, можно констатировать следующее:

- Наиболее простым с технологической точки зрения, надежным, обеспечивающим экологическую безопасность и воспроизводимость структуры и свойств металла в отливках самого различного назначения, в том числе толстостенных и крупнотоннажных, остается способ обработки расплава PЗМ-содержащими лигатурами [8].

- С разработкой новых экологически чистых методов ввода присадок в жидкий чугун получает все большее распространение метод, основанный на обработке исходного расплава лигатурами, содержащими магний и PЗМ без десфероидизатора (Ti), позволяющий удешевить технологический процесс за счет

замены в присадке части относительно дорогих PЗМ более дешевым Mg и не оказывать отрицательного влияния на шихту за счет собственного возврата.

- В условиях серийного производства, в том числе с использованием чугуна ваграночной плавки, продолжают производить отливки из чугуна с вермикулярным графитом с помощью лигатур, содержащих титан и магний, основным недостатком которого является проблема последующего рационального использования титан-содержащего возврата. Кроме того, требуемые небольшие концентрации магния в узких пределах не позволяют надежно производить отливки из чугуна с вермикулярным графитом с толщиной стенки более 50 мм и массой более 5 т.

Дальнейшее развитие надежных технологий по производству чугуна с вермикулярным графитом будет определяться разработкой новых методик и аппаратуры для экспрессного контроля остаточных содержаний основных активных элементов, воздействующих на форму графита, и методов термического анализа и компьютерной обработки кривых охлаждения проб.

Анализируя в целом физико-механические, литейные и эксплуатационные свойства чугуна с вермикулярным графитом, можно выделить следующие наиболее перспективные направления реализации технических и экономических преимуществ от его применения в разных отраслях машиностроения:

- В связи с более высокими (в 1,5–2 раза) прочностными ( $\sigma_B$ ) и особенно усталостными ( $\sigma_{-1}$ ) характеристиками чугуна с вермикулярным графитом (рис. 4) открывается перспектива замены обычных марок серого чугуна с пластинчатым графитом с целью снижения (на 25–30%) массы отливок, экономии металла и повышения эксплуатационной надежности деталей.

- Весьма эффективно использовать чугун с вермикулярным графитом в качестве конструкционного материала наиболее ответственных крупных базовых деталей различных машин и оборудования для повышения уровня их механических свойств и увеличения гарантийного срока службы без ухудшения технологичности отливок.

- Сочетания высоких показателей механических свойств и повышенной теплопроводности делает перспективным применение чугуна с вермикулярным графитом для деталей, работающих в условиях теплосмен



Рис. 3. Блок (картер) 8-цилиндрового дизеля 8ДМ21 из чугуна с вермикулярным графитом (обработка модификатором Vermitloy). Масса отливки ≈4500 кг, толщина стенок 10–80 мм

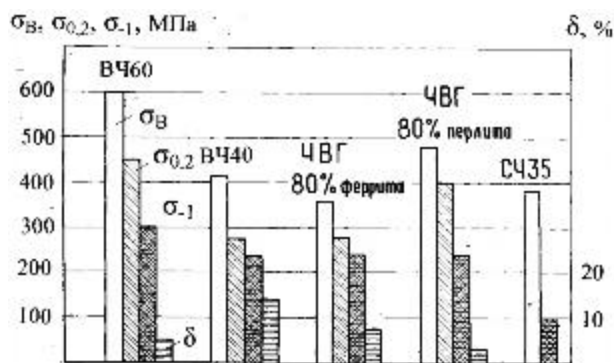


Рис. 4. Диаграмма механических свойств чугунов с разной формой графита

Области эффективного применения чугунов с вермикулярным графитом в промышленности

Марка чугуна (ГОСТ 28394-89)	Область применения	Примеры отливок
ЧВГ30, ЧВГ35, ЧВГ40 (ферритный)	<p>Детали общего машиностроения (взамен серого чугуна), работающие при повышенных циклических механических нагрузках.</p> <p>Детали автомобилей, дизельных двигателей, работающие в условиях воздействия переменных повышенных температур и высоких механических нагрузок.</p> <p>Детали металлургического оборудования и металлической (кокильной) оснастки, подверженных воздействию больших механических нагрузок и циклических высоких температур</p>	<p>Базовые и корпусные детали станков, различных машин, кузнечного и прессового оборудования.</p> <p>Крышки (головки) и блоки цилиндров, корпуса турбокомпрессоров автомобильных, тепловозных и судовых двигателей.</p> <p>Крышки и корпуса коробок передач, выхлопные коллекторы, тормозные барабаны маховики и т.п.</p> <p>Прокатные валки. Изложницы, поддоны, крышки промежуточных ковшей МНЛЗ, кокили</p>
ЧВГ45 (перлитный)	Детали, работающие при высоких механических нагрузках в условиях воздействия повышенных циклических температур, трения, износа и гидрокавитации	Цилиндровые втулки, цельнолитые поршни мощных форсированных дизелей, корпуса гидроаппаратуры высокого давления, узлы сочленений, работающих при ограниченной смазке или сухом трении

при значительном перепаде температур и испытывающих большие термоциклические нагрузки, с целью повышения их надежности и работоспособности.

• Разработанная в НПО «ЦНИИТМАШ» новая технология получения низколегированного чугуна с вермикулярным графитом и перлитной матрицей [9] открывает возможность изготовления из этого чугуна деталей цилиндропоршневой группы дизельных двигателей, работающих в условиях высоких механических нагрузок, повышенных температур и интенсивного износа, с целью повышения параметров и эксплуатационной надежности силовых агрегатов.

Кроме того, хорошие литейные свойства позволяют

в отдельных случаях использовать чугун с вермикулярным графитом взамен высокопрочного чугуна с шаровидным графитом для получения сложных фасонных нетехнологичных отливок, в которых трудно, а порой и невозможно предотвратить даже специальными методами образование усадочных дефектов. В результате обеспечиваются более высокая плотность и качество металла в отливке, чем компенсируется некоторое снижение прочностных характеристик чугуна.

В табл. 4 приведены рекомендуемые области применения чугунов с вермикулярным графитом и примеры производимых отливок из этого прогрессивного конструкционного материала.

## Список литературы

1. Андреев В.В. Технология и перспективы производства отливок из чугуна с вермикулярным графитом // Металлургия машиностроения. 2004. № 3. С. 26–33.
2. Der Einsatz des Werkstoffes Gußeisen mit Vermiculargraphit aus Technischer und wirtschaftlicher Sicht. /J. Siessener, W. Thury, R. Hummer, E. Nechtelberger // Gießerei-Praxis. 1972. № 22. S. 396–404.
3. Riemer K.H. Gußeisen mit Vermiculargraphit und seine Vorarbeitung zu Zylinderdeckeln für Hochleistungs-Dieselmotoren // Giesserei. 1976. № 10. S. 285–291.
4. Чугун с вермикулярным графитом – материал для стеклоформ / С.П. Королев, В.М. Королев, Д.Н. Худокормов // Литейное производство. 1996. № 1. С. 6–8.
5. Ekob. C. // Foundry Trade Journal. 175 (2001). 3579 (Juni). P. 20–21.
6. Compacted Graphite Cast Irons and Their Production by a Single Alloy Addition / E.R. Evans, M.J. Lalic // AFS Trans. 84 (1876). S. 215–220.
7. Производство отливок из чугуна с вермикулярным графитом на Литейном заводе ОАО «КАМАЗ» / С.П. Королев, Э.В. Панфилов, Р.Г. Усманов и др. // Литейное производство. 2006. № 5. С. 2–5.
8. Андреев В.В. Влияние толщины стенки отливки на прочностные характеристики и микроструктуру высокопрочных чугунов с вермикулярным и шаровидным графитом // Литейное производство. 2004. № 2. С. 2–7.
9. Андреев В.В. Свойства втулок цилиндров из чугуна с вермикулярным графитом // Литейное производство. 1991. № 2. С. 17–18.

## List of literature

1. Andreev V.V. The technology and prospects of cast iron mould production with vermiculite graphite. Machine-building technology. 2004. № 3 P. 26–33.
2. Der Einsatz des Werkstoffes Gußeisen mit Vermiculargraphit aus Technischer und wirtschaftlicher Sicht. /J. Siessener, W. Thury, R. Hummer, E. Nechtelberger // Gießerei-Praxis. 1972. № 22. S. 396–404.
3. Riemer K.H. Gußeisen mit Vermiculargraphit und seine Vorarbeitung zu Zylinderdeckeln für Hochleistungs-Dieselmotoren // Giesserei. 1976. № 10. S. 285–291.
4. Iron cast with vermiculite graphite – material for glass forms. S.P. Korolev, V.M. Korolev, D.N. Khudokormov // Casting production. 1996. № 1.P. 6–8.
5. Ekob. C. // Foundry Trade Journal. 175 (2001). 3579 (Juni). P. 20–21.
6. Compacted Graphite Cast Irons and Their Production by a Single Alloy Addition / E.R. Evans, M.J. Lalic // AFS Trans. 84 (1876). S. 215–220.
7. Cast iron mould production with vermiculite graphite at the OJSC Foundry “KAMAZ”. S.P. Korolev, E.V. Panfilov, R.G. Usmanov and others // Casting production. 2006. № 5. P. 2-5.
8. Andreev V.V. The impact of the wall thickness of the moulds on the strength properties and microstructure of high-strength cast iron with vermiculite and spherical graphite // Casting production. 2004. №2. P. 2–7.
9. Andreev V.V. The properties of the cast iron cylinder sleeves with vermiculite graphite // Casting production. 1991. № 2. P. 17–18.