

4.4. Разработка состава и технологии получения высокопрочного чугуна для поршневых колец судовых дизелей

4.1.1. Условия работы и требования к материалу компрессионных колец. Компрессионные кольца дизелей работают в тяжелых условиях эксплуатации, особенно первое (верхнее) кольцо. Совершая вместе с поршнем возвратно-поступательное движение, кольца сильно нагреваются от канавок в головке поршня, а также вследствие трения о втулку цилиндра и соприкосновения с горячими газами. Температура первого компрессионного кольца достигает 220...250 °С. Давление кольца на втулку для первого компрессионного кольца составляет порядка 80 % от максимального давления газов в цилиндре P_z , второго – 25...30 %, третьего – 8...10 %. В связи с высокими давлениями и особенностями расположения первого кольца трудно обеспечить надежную смазку кольца, что вызывает его повышенный износ. Процесс усугубляется реверсом кольца в мертвых точках, когда смазка полностью выжимается из зоны трения. Эксплуатация двух верхних колец часто происходит в условиях полусухого трения.

Работоспособность колец в большой степени зависит от их упругих свойств. Потеря упругости вызывает “залегание” колец в поршневых канавках и прекращение их уплотнительного действия. Особенно это касается первого компрессионного кольца, работающего при относительно высокой температуре. Современный этап развития дизелестроения характеризуется переходом на использование тяжелого высокосернистого топлива, что приводит к возрастанию доли коррозионно-механического износа в общем износе поршневых колец.

Форсирование дизелей по частоте вращения увеличивает вероятность схватывания второго рода вследствие перегрузки зоны контакта. Материал кольца должен обладать определенной маслосемкостью для обеспечения смазки трущихся поверхностей в период пуска двигателя, когда смазка еще не

поступила в зону трения. Поршневые кольца должны быстро и полно притираться к поверхности втулки как на новой машине, так и после смены колец при ремонте, когда имеются искажения макрогеометрии цилиндра. Материал кольца должен противостоять схватыванию и образованию задира при временном отсутствии смазки или неравномерной нагрузке на рабочей поверхности. Кроме всего, требуется постоянное увеличение общего ресурса дизеля и ресурса до первой переборки. Кольцо должно хорошо работать в паре с втулкой и не вызывать ее повышенного износа.

Исходя из изложенного выше, к материалу поршневых колец предъявляются следующие требования:

- высокая износостойкость в условиях граничного и полусухого трения при высоких температурах, малых и больших скоростях скольжения;
- высокая прочность;
- высокая твердость;
- упругость и термоупругость;
- стабильность свойств и структуры;
- химическая стойкость против серных соединений;
- маслостойкость;
- хорошая прирабатываемость;
- задиростойкость;
- технологичность и дешевизна.

В настоящее время для компрессионных и маслосъемных поршневых колец судовых дизелей применяются, в основном, серый и высокопрочный чугуны. Серый чугун по сравнению с высокопрочным обладает более низкими механическими и износостойкими свойствами. Он не способен работать при давлении P_z до 12...14 МПа, развиваемых в современных дизелях.

Комплексно-легированный серый чугун имеет более высокие механические и износостойкие свойства [142], но все же уступает высокопрочному по износостойкости, маслостойкости и упругости.

Высокопрочный чугун имеет модуль упругости 165000...175000 МПа против 85000...130000 МПа у серого чугуна. Высокопрочный чугун имеет графит в виде крупных глобулярных включений, которые хорошо поглощают масло, а затем выделяют его на поверхность трения при его временном отсутствии и препятствуют образованию задира.

Хорошие результаты получены при покрытии рабочих поверхностей колец слоем пористого хрома, плазменным напылением молибдена или другого высокоизносостойкого материала в сочетании с физическими покрытиями. В этом случае основа для напыления должна быть хорошей и обладать высокой термоупругостью. Хорошей маслостойкостью и износостойкостью обладают поршневые кольца, полученные путем спекания из порошкообразных шихтовочных материалов. Но они имеют меньшую упругость и механическую прочность.

4.1.2. Разработка химсостава высокопрочного чугуна для колец форсированных судовых дизелей. Как уже отмечалось, высокопрочный чугун обладает повышенными износостойкими свойствами по сравнению с серым, а комплексно-легированный – еще более высокими свойствами. Целью исследования являлась разработка оптимального химического состава высокопрочного чугуна для поршневых колец форсированного среднеоборотного судового дизеля 6ЧН 26/34.

Сравним некоторые свойства высокопрочного чугуна с серым чугуном и другими материалами.

Плотность высокопрочного чугуна несколько выше, чем у серого чугуна того же состава и металлической матрицы.

Коэффициент термического расширения у высокопрочного чугуна несколько выше, чем у серого чугуна, что хуже.

Теплопроводность у высокопрочного чугуна несколько ниже, чем у серого чугуна, вследствие чего кольца хуже отводят тепло, но это может быть лучше с точки зрения уменьшения тепловых потерь.

Износостойкость у высокопрочного чугуна значительно выше, чем у серого чугуна, особенно при легировании Ni, Cr, Mo. Ниже коэффициент трения.

Герметичность выше, чем у серого чугуна.

Жаростойкость высокопрочного чугуна выше, чем у серого чугуна, вследствие меньшего окисления металла по границам разбросанных включений графита. Явление роста до 400...500 °С не наблюдается, механические свойства при этих температурах снижаются незначительно.

Обрабатываемость высокопрочного чугуна зависит от твердости. Усилие резания у высокопрочного чугуна на 50...60 % выше, чем при обработке серого чугуна той же твердости, но при одинаковых значениях прочности обрабатываемость поверхности высокопрочного чугуна лучше, чем серого чугуна и стали. Чистота поверхности очень высокая.

Литейные свойства высокопрочного чугуна отличаются от серого чугуна. Жидкотекучесть высокопрочного чугуна выше, чем у серого чугуна высоких марок. Усадка значительно выше, чем у серого чугуна, что является причиной образования усадочных дефектов. Усадка в жидком состоянии не отличается от серого чугуна. Литейные напряжения значительно выше, чем в отливках из серого чугуна.

Комплекс положительных свойств высокопрочного чугуна способствовал его распространению в качестве материала поршневых колец двигателей отечественного и зарубежного производства [58; 197], недостатки требуют дальнейших работ по его совершенствованию.

Проведенный анализ влияния химического состава чугуна, обзор применяемых чугунов в двигателях и проведенные исследования позволяют предложить состав чугуна, обладающего высокими износостойкими свойствами.

Разработанный автором и защищенный авторским свидетельством СССР № 1109459 высокопрочный чугун для поршневых колец судовых дизелей имеет химический состав, представленный в табл. 4.7.

Таблица 4.1

Химический состав высокопрочного чугуна, % мас.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Mg	PЗМ
3,2... 3,6	2,0... 2,4	0,6... 0,8	0,10... 0,15	до 0,05	0,2... 0,4	0,2... 0,4	0,15... 0,35	0,4... 0,6	0,05... 0,15	0,05... 0,08	до 0,04

4.1.3. Получение комплексно-легированного высокопрочного чугуна в условиях ваграночного производства. Получение легированного высокопрочного чугуна в условиях ваграночного производства литейного цеха завода “Первомайскдизельмаш” существенно затруднено вводом легирующих элементов, таких как молибден, ванадий, титан, хром, в чистом виде и в виде ферросплавов. При завалке ферросплавов в вагранку происходит их сильный угар и малая усвояемость. Получение разработанного состава чугуна в условиях ваграночного производства может быть достигнуто при применении легкоплавкой лигатуры и базового состава высокопрочного чугуна. Количество легирующих элементов в лигатуре и их процентное соотношение определится как разность химических составов разработанного чугуна и базового. Для получения легкоплавкой лигатуры в нее введено 25...35 % меди и 5...7 % кремния. Учитывая, что температура выпуска металла из копильника вагранки достигает 1430...1440 °С, можно вводить до 12...14 кг лигатуры на тонну металла без опасения значительно понизить температуру металла перед заливкой.

Химсостав лигатуры для высокопрочного чугуна приведен в табл. 4.8.

Таблица 4.2

Химический состав лигатуры

Si	P	Ti	Mo	Cu	V	Cr	PЗМ	Ni	Fe
5...7	8...10	2...3	15...18	25...35	4...5	2...3	0,1...2	12...16	ост.

Лигатуру выплавляли в индукционной печи емкостью 1000 кг при сплавлении шихты (табл. 4.9).

Таблица 4.3

Шихтовые материалы для выплавки 100 кг лигатуры

Наименование шихты	Количество, кг
Кремний металлический	6
Медь фосфористая	35
Ферромолибден	22
Феррохром	3,5
Никель	14
Феррованадий	8
Ферротитан	5
Лигатура с РЗМ	8
Фосфор	5
Итого	106,5

Угар при выплавке составляет 6,5 кг на 100 кг лигатуры. Последовательность ввода шихты в печь следующая: медь фосфористая, никель, феррохром, ферромолибден, феррованадий, фосфор, кремний; ферротитан и лигатура с РЗМ вводилась непосредственно перед выпуском металла. Температура расплава доводилась до 1550 °С. Лигатура сливалась на песчано-глинистую подушку слоем толщиной 15...20 мм. Полученная лигатура представляет собой плотный сплав серебристого цвета, хрупкая и твердая. Лигатура дробилась на гранулы размером 12...15 мм. На разработанную лигатуру получено авторское свидетельство СССР № 1076481.

4.1.4. Влияние технологии получения заготовок на эксплуатационные свойства материала колец. В настоящее время получили распространение, в основном, два способа изготовления заготовок поршневых колец: из маслот и из индивидуальных отливок. Поршневые кольца малого размера отливаются, как правило, индивидуально. Способ очень экономичный, но требует строгого соблюдения химсостава. Кольца диаметром 200...400 мм получают как индивидуально, так и из маслот.

Выплавка чугуна в вагранке не может гарантировать строгое соблюдение химсостава, и поэтому будем рассматривать только технологию получения маслот. Получение маслот обеспечивается следующими путями: центробежной отливкой, стационарным литьем в песчано-глинистые формы, методом вакуумного всасывания.

Каждый из способов отливки имеет свои преимущества и недостатки и может быть рекомендован для быстрого внедрения, внедрения в ближайшем будущем и на перспективу.

Отливка маслот в разовые песчано-глинистые формы имеет ряд преимуществ:

- возможность получения отливок практически на любом машиностроительном заводе с использованием несложного оборудования;
- исключение отбела чугуна;
- дешевизна отливок;
- получение отливки эллипсной формы (близкой к форме кольца).

Но этот метод имеет и некоторые недостатки:

- дефицитность формовочных песков;
- большой расход жидкого металла вследствие наличия прибыли и литников;
- загрязнение окружающей среды;
- низкое качество отливок.

В условиях ваграночного производства существует также трудность получения легированного чугуна.

Разработанная лигатура позволила произвести отливку маслот из комплексно-легированного высокопрочного чугуна в разовые песчано-глинистые формы в литейном цехе завода “Первомайскдизельмаш”.

Лигатура дробилась гранулами 10...15 мм, подогревалась до 650...700 °С в электропечи сопротивления. Ввод лигатуры осуществлялся на желобе вагранки подачей ее малыми дозами в струю металла. Температура металла на выпуске 1440 °С. Емкость ковша 700 кг. Лигатура вводилась из расчета 12 кг

на тонну жидкого металла. Модифицирование чугуна осуществлялось металлическим магнием в автоклаве после легирования. Отливались маслоты весом 50 кг. Для сравнения свойств легированного и базового чугуна производилась параллельная отливка маслот из серийного чугуна.

Химический состав и механические свойства чугунов приведены в табл. 4.10.

Как видно из табл. 4.10, введение лигатуры обеспечило получение комплексно-легированного высокопрочного чугуна. Состав лигатуры строго сбалансирован, т.е. в ее состав входят в равной мере как карбидообразующие элементы, так и графитизирующие. Это позволило получить легированную металлическую основу чугуна без увеличения твердости в литом состоянии. Наиболее полно влияние легирования на механические свойства выявляется после проведения термообработки: значительно выросла как прочность чугуна, так и относительное удлинение.

Исследование микроструктуры показывает, что комплексно-легированный высокопрочный чугун в литом состоянии имеет структуру глобулярного графита и чисто перлитной матрицы с отдельными включениями двойной фосфидной эвтектики без наличия структурно-свободного цементита и феррита.

Исследование структуры и механических свойств показывает, что комплексное легирование высокопрочного чугуна Mo, Ni, Cr, V позволяет значительно повысить механические свойства, стабилизировать структуру и приблизить ее к оптимальной для условий работы компрессионных поршневых колец форсированных судовых дизелей.

Центробежная отливка маслот поршневых колец по сравнению с литьем в песчано-глинистые формы дает значительную экономию жидкого металла вследствие отсутствия прибыли и более плотную и чистую отливку.

Центробежную отливку маслот поршневых колец судовых дизелей ЧН 26/34 проводили на Черноморском судостроительном заводе (г. Николаев).

Таблица 4.10

Химический состав чугунов

		Химический состав, % мас.													Твердость, HRB
Плавка	Чугун	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Ti	Mg		
№ 68	Базовый	3,56	2,39	0,70	0,08	0,017	сл.	-	-	-	-	-	0,03	101	
	Опытный	3,53	2,63	0,75	0,09	0,017	0,27	0,1	0,1	0,37	0,1	0,05	0,079	101	
№ 79	Базовый	3,56	2,49	0,51	0,07	0,028	сл.	-	-	-	-	-	0,06	102	
	Опытный	3,53	2,63	0,65	0,08	0,026	0,20	0,1	0,16	0,57	0,08	0,06	0,055	101	
	Опытный	3,6	2,66	0,74	0,10	0,024	0,19	0,1	0,18	0,63	0,10	0,07	0,055	102	

Чугун выплавляли в индукционной печи ИСТ-04. Шихтой служили литейный чугун марки ЛК-3, сталь 20 и ферросплавы Mo, V, Ti, Cr. Никель вводился в чистом виде, а медь – в виде фосфористой меди. Модифицирование для получения глобулярного графита осуществлялось в ковше иттрием из расчета 0,02 % с последующим модифицированием ферросилицием. Химический состав чугуна приведен в табл. 4.11.

Таблица 4.4

Химический состав высокопрочного чугуна, % мас.

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Cu	V	P	S
2,9... 3,4	1,9... 2,4	0,6... 0,9	0,3... 0,5	0,1... 0,3	0,2... 0,4	0,2... 0,3	0,8... 1,0	до 0,2	0,1... 0,15	до 0,05

Отливка заготовок производилась центробежным способом в изолированный кокиль диаметром 290 мм. Длина отливки 320 мм. В качестве изоляции применялась смесь кварцевого песка с 3 % пульвербакелита. Смесь наносилась на внутреннюю поверхность кокиля толщиной 5...7 мм. Прочность корки достигалась за счет спекания при нагреве кокиля до 220...270 °С.

Для получения высокой чистоты поверхности отливки корка дополнительно покрывалась слоем цирконовой краски.

Температура выплавки достигала 1450...1470 °С, температура заливки – 1350...1380 °С.

Толщина отливки 25...28 мм. Дозирование металла выполнялось заливкой металла “под крышку”. Опытный чугун имел высокие механические свойства $\sigma_{и} = 510...540$ МПа, $\delta = 2...3$ % в литом состоянии. Твердость чугуна достигала 290 НВ. Микроструктурные исследования показали наличие в чугуне структурно-свободного цементита в количестве до 20 % площади шлифа. Выделение цементита объясняется малой толщиной стенки отливки, высокой скоростью охлаждения в кокиле и присутствием в чугуне карбидообразующих элементов. Для получения более благоприятной структуры необходимо идти на увеличение содержания кремния, что, как

было показано выше, нежелательно. Графитовые включения, вследствие повышенной скорости охлаждения, являются не чисто глобулярными, а близки к вермикулярному, что также нежелательно.

Присутствия структурно-свободного феррита в чугунах не обнаружено. Металлическая матрица состоит из мелкопластинчатого и сорбитообразного перлита.

Также проводилась отливка маслотов методом вакуумного всасывания. Применение специальных способов литья при получении чугунных отливок приводит к повышению механических и физических свойств изделий, а также к улучшению экономических показателей технологии отливки.

Разработанная технология и конструкция установки литья вакуумным всасыванием чугунных изделий позволяет отливать детали без расхода жидкого металла на литниковопитательную систему, что приводит к повышению коэффициента использования жидкого металла до 0,95...0,98 (работа проведена совместно с О.Ф. Прищеповым). Проведенные исследования физических и механических свойств отливок, полученных этим способом, свидетельствуют об их возрастании. Износостойкость образцов, вырезанных из отливок, полученных вакуумным всасыванием из серого и высокопрочного чугунов, и испытанных на машине трения СМЦ-2, повышается в среднем на 15...20 %. Метод литья вакуумным всасыванием значительно снижает брак изделий по газовой и усадочной пористости и неметаллическим включениям вследствие того, что расплав жидкого чугуна поступает в полость формы по металлопроводу из глубинных слоев тигля или ковша. Попадание шлака в полость формы полностью исключено из-за постоянной подпитки отливок в процессе кристаллизации, которая осуществляется посредством давления на расплав, увеличивается размерная точность отливок и уменьшается припуск на механическую обработку.

Были проведены микроструктурные исследования образцов, полученных из чугуна ВЧ50 отливкой вакуумным всасыванием. Исследования показали измельчение графитовых включений, увеличение их количества и

более равномерное распределение. Количество перлита в структуре чугуна, отлитого вакуумным всасыванием, увеличивается до 98 %. Указанные структурные изменения объясняются ускорением процесса кристаллизации, которое происходит при вакуумном всасывании за счет уменьшения зазора между отливкой и формой, а также за счет принудительного отсоса газов и паров из формы, вследствие чего отводится большое количество тепла.

4.1.5. Износостойкие испытания опытных и серийных чугунов. Износостойкие свойства чугунов зависят от многих факторов: химического состава, структуры, технологии получения заготовки, механических свойств и многих других, а также от внешних условий трения (давления, скорости, температуры) и применяемой смазки. Обеспечить идентичность условий работы лабораторных образцов и реальной пары трения практически невозможно. Но лабораторные испытания различных материалов в одинаковых условиях, близких к условиям работы деталей в двигателе, могут дать реальное соотношение износостойких свойств этих материалов.

Результаты износостойких испытаний, проведенных на машине трения СМЦ-2 по схеме “диск – колодка”, приведены в табл. 4.12.

Таблица 4.5

Износостойкие свойства чугунов

Чугун	Максимальный износ ролика за $600 \cdot 10^3$ циклов, мкм	Интенсивность изнашивания колодки, мкм/ 10^6 циклов	Интенсивность изнашивания пары, мкм/ 10^6 циклов	Коэффициент трения
Серийный ВЧ 50	6,4	0,9	2,2	0,062
Комплексно-легированный	3,8	0,4	1,0	0,053
Центробежная отливка	11,8	1,2	1,8	0,068
Литье вакуумным всасыванием	5,5	0,8	1,6	0,056

Как показывают испытания, наилучшим комплексом антифрикционных свойств обладает высокопрочный комплексно-легированный чугун.

Комплексное легирование высокопрочного чугуна Mo, Ni, Cr, V, Cu значительно повышает все свойства чугуна и может быть рекомендовано для внедрения при отливке поршневых колец форсированных судовых дизелей.