

УДК 621.431.3
DOI: 10.12737/17093

В.В. Роголев, О.А. Чернявский

ЭВОЛЮЦИЯ МАТЕРИАЛОВ ОТВЕТСТВЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ МАЛООБОРОТНЫХ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Представлена динамика изменения механических характеристик сталей и чугунов, используемых при изготовлении компонентов малооборотных судовых дизелей. Сделаны выводы о дальнейшем со-

вершенствовании материалов.

Ключевые слова: малооборотный судовый дизель, совершенствование материалов, механические характеристики, стали, чугуны.

V.V. Rogalyov, O.A. Chernyavsky

MATERIAL EVOLUTION IN CRITICAL PARTS OF MARINE LOW-SPEED ENGINES

With the growth of average effective pressure in cylinders of marine low-speed diesel engines the requirements increased to materials used for manufacturing their critical parts. This paper reports the dynamics of mechanical data changes in materials (steel and cast iron) of critical parts in diesel engines by the example of produce of the Bryansk engineering plant. From 1961 till 2008 the Bryansk engineering plant is the only manufacturer of powerful marine low-speed diesel engines in Russia. Diesel engines were being built under licence of "MAN Burmeister Diesel" Co. Diesel engines manufactures in different years differ with forcing degree. A diesel engine with a higher forcing degree has a higher value of mean effective pressure. In the paper there are shown types of diesel engines manufactured by the Bryansk engineering plant and is shown

the evolution of mechanical data of cylinder iron bushes, piston rings, steel components of a bed frame, crankshafts.

It is pointed out that the application of new steel and cast iron kinds should follow considerable changes in the design of marine low-speed diesel engines of the type 6DKRN 50/200-14 of compact modification.

The conclusion is drawn of that with the growth of a forcing degree in diesel engines the mechanical data of steel and cast iron will increase at the expense of material chemistry changes by means of the introduction of alloying elements and application of modern metallurgical equipment for qualitative billet manufacturing.

Key words: marine low-speed diesel engine, material updating, mechanical data, steel, cast iron.

Требования к показателям судовых малооборотных дизелей (МОД), таким как среднее эффективное давление P_e , максимальное давление цикла P_z , давление наддува P_k , КПД двигателя, удельный эффективный расход топлива g_e и удельная мощность (кВт на тонну), постоянно возрастают. По мере роста показателей дизелей возрастают и требования, предъявляемые к материалам. В статье обобщены результаты исследований отечественных материалов ответственных компонентов дизелей на примере продукции Брянского машиностроительного завода (БМЗ).

С 1961 по 2008 год БМЗ являлся единственным в России и на постсоветском пространстве производителем мощных судовых МОД. Дизели изготовлялись по лицензии фирмы «МАН Бурмайстер Дизель» («МБД»). Всего за указанный период было изготовлено и отправлено судостроительным верфям более 1000 дизелей.

Судовые малооборотные дизели имеют обозначение по ГОСТу, например: 6ДКРН 50/200-14, где 6 – число цилиндров; Д – двухтактный дизель; К – крейцкопфный; Р – реверсивный; Н – с наддувом; 50 – диаметр цилиндра, см; 200 – ход поршня, см; 14 – степень форсировки дизеля. Дизели также имеют обозначения завода-изготовителя (ДБ-62) и фирмы, по лицензии которой они выпускаются (S50MC-C).

Дизели, изготовленные в разные годы, отличаются степенью форсировки. Дизели более высокой степени форсировки имеют более высокое значение среднего эффективного давления P_e . Дизели одной степени форсировки унифицированы. Дизели с различной степенью форсировки существенно отличаются друг от друга. Так, дизели третьей и четвертой степени форсировки отличаются по конструкции деталей, образующих камеру сгорания (рис. 1).

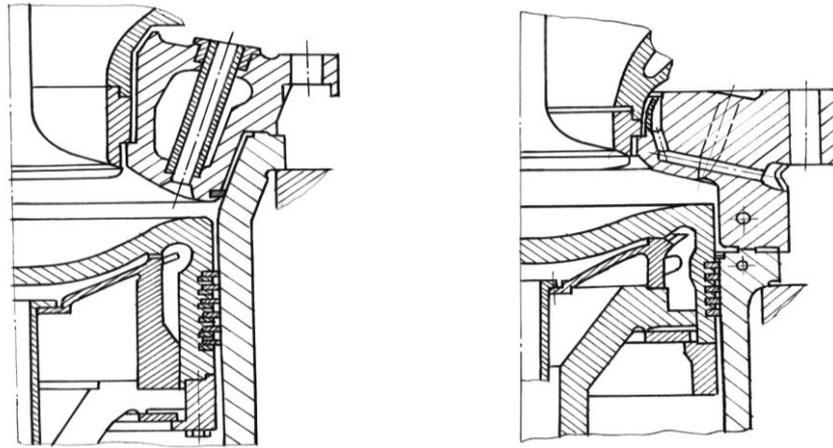


Рис. 1. Конструкции камер сгорания дизелей третьей (слева) и четвертой (справа) степени форсировки

В верхней части втулки цилиндра дизеля третьей степени форсировки имеется коническое расширение; поршень при достижении ВМТ не выступает из втулки; нижняя часть крышки цилиндра имеет коническую форму; крышка уплотняется с помощью медного кольца, установленного между коническими поверхностями втулки и крышки. Втулка цилиндра дизеля чет-

вертой степени форсировки – цилиндрическая; поршень при достижении ВМТ выступает из втулки; крышка цилиндра и втулка уплотняются по горизонтальной плоскости.

Важнейшие параметры рабочего процесса некоторых судовых малооборотных дизелей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Изменение параметров малооборотных дизелей в зависимости от степени форсировки

Заводское обозначение	Обозначение по ГОСТу	Степень форсировки	S/D	P_k , МПа	g_e , г/(кВт·ч)	P_e , МПа	P_z , МПа
ДБ-2	9ДКРН 50/110	1	2,2	0,14	220	0,71	5,6
ДБ-7	7ДКРН 50/110-2	2	2,2	0,17	211	0,85	6,5
ДБ-16	5ДКРН 62/140-3	3	2,25	0,195	214	0,93	7,0
ДБ-21	9ДКРН 80/160-4	4	2,0	0,220	208	1,10	8,3
ДБ-29	7ДКРН 67/170-7	7	2,54	0,27	189	1,32	8,6
ДБ-32	8ДКРН 60/195-10	10	3,25	0,315	174	1,65	12,8
ДБ-56	6ДКРН 60/195-11	11	3,25	0,35	174	1,73	14,3
ДБ-42	6ДКРН 26/98-12	12	3,77	0,37	177	1,71	17,3
ДБ-46	6ДКРН 60/229-13	13	3,82	0,34	172	1,73	12,8
ДБ-62	5ДКРН 50/200-14	14	4,0	0,346	171	1,80	15,3
ДБ-71	7ДКРН 50/200-15	15	4,0	0,381	171	2,00	15,3

Из табл. 1 видно, что отношение хода поршня S к диаметру цилиндра D с ростом степени форсировки увеличилось со значения 2,2 до значения 4,0, давление наддува P_k достигло величины 0,381 МПа, максимальное давление цикла P_z возросло от 5,6 МПа до 15,3 МПа. Это позволило увеличить среднее эффективное давление цикла P_e до 2,0 МПа. Удельный эффектив-

ный расход топлива g_e снизился с 220 до 171 г/(кВт·ч). КПД судовых малооборотных дизелей составляет около 54 %, что значительно превышает КПД других двигателей внутреннего сгорания. На рис. 2 и 3 проиллюстрировано развитие параметров дизелей фирмы «МБД» за период с 1960 по 2000 год.

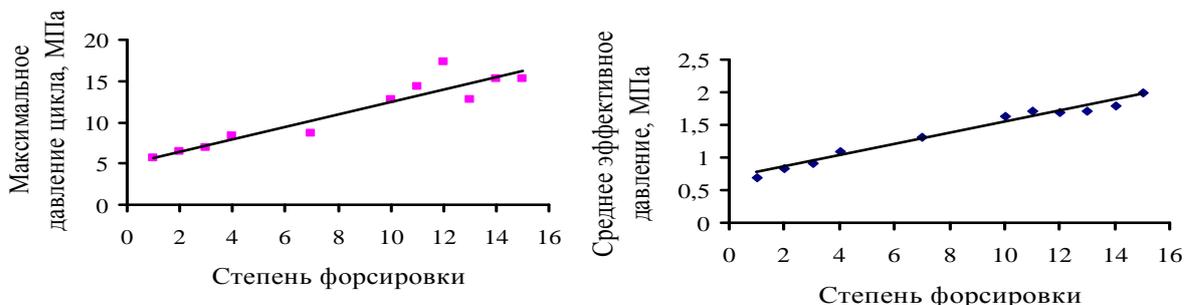
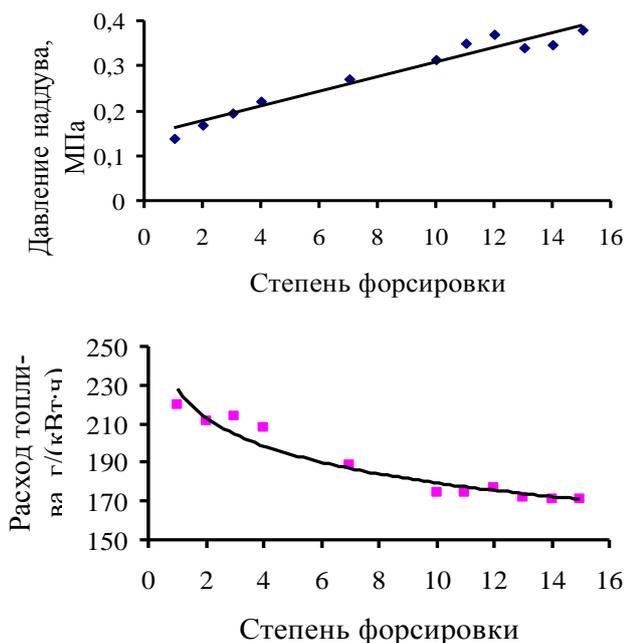
Рис. 2. Изменение P_z и P_e малооборотных дизелей в зависимости от степени форсировки

Рис. 3. Изменение параметров малооборотных дизелей в зависимости от степени форсировки

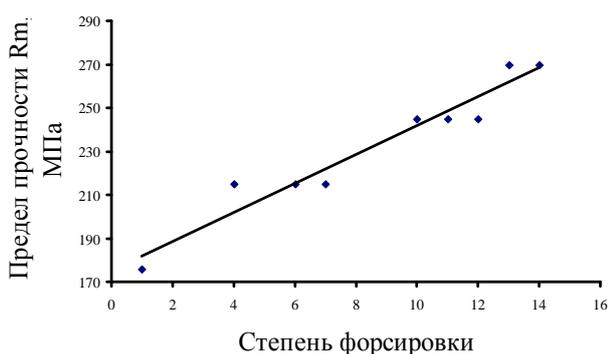


Рис. 4. Тренд предела прочности материала для изготовления втулки цилиндра

Как видно из приведенных графиков, среднее эффективное давление дизелей почти утроилось, удельный расход топлива существенно уменьшен, и все это – вклад в значительное снижение инвестиций капитала и расходов на эксплуатацию.

По мере роста степени форсировки дизелей возрастали и требования к материалам, закладываемым в конструкцию фирмой-лицензиаром. В табл. 2 приведены типы выпущенных БМЗ дизелей и показана эволюция механических характеристик чугунных втулок цилиндров, поршневых колец, стальных компонентов постелей фундаментной рамы, кривошипов коленчатых валов.

При освоении производства отливок втулок цилиндров из чугуна РВА (обозначение «МБД») для дизелей 7ДКРН 74/160, 9ДКРН 50/100, 9ДКРН 84/180-3 и других, изготовляемых до 1976 года, требовался металл с пределом прочности $R_m = 176,5$ МПа, твердостью 170...210 НВ. Позднее для дизелей 9ДКРН 80/160-4 (4-й степени форсировки), 6 ДКРН 67/170-7 (7-й степени форсировки) значение предела прочности отливок втулок цилиндров увеличилось до $R_m = 215$ МПа. Указанное было достигнуто изменением химического состава чугуна и добавлением 0,22...0,28 % ванадия. Для дизелей 10-й степени форсировки изменилась марка («Таркаллой» по обозначению «МБД») и химический состав чугуна, а $R_m = 215$ МПа при твердости 180...230 НВ. Для дизелей 6ДКРН 42/136-11, 6ДКРН 29/98-13, 6ДКРН 50/200-14 путем оптимизации химического состава чугуна ($V = 0,02\%$, $Cu = 1,0...1,5\%$, $V = \max 0,22\%$) было достигнуто значение предела прочности $R_m = 245$ МПа при НВ = 180...230 НВ. На версиях дизелей 6ДКРН 60/240-14 втулки цилиндров изготовлялись из чугуна с $R_m = 270$ МПа, твердость – 180...230 НВ (рис. 4). Аналогичная динамика увеличения прочностных характери-

стик материалов поршневых колец, постелей фундаментных рам, кривошипов ко-

ленчатых валов прослеживается по данным, приведенным в табл. 2.

Таблица 2

Эволюция механических характеристик материалов ответственных компонентов малооборотных судовых дизелей

Обозначение дизеля по ГОСТу	Наиболее ответственные чугунные и стальные отливки дизелей (материал, свойства)			
	Втулки цилиндров	Поршневые кольца	Постели фундаментной рамы	Кривошипы коленчатых валов
7 ДКРН 74/160	До 1976 года: чугун РВА, Rm = 176,5 МПа, 170...210 НВ. С 1976 года: чугун РВА, Rm = 215 МПа, 170...210 НВ	Чугун С8, 90...220 НВ	Сталь спец. углеродистая гр. III, ТУ 24-4-01-71-76 (до 1990 г.), Rm = 400...500 МПа, Re ≥ 206 МПа, A ≥ 26 %, Z ≥ 45 %, 115...145 НВ	Сталь литая спец. углеродистая, ТУ 24-4-01-081-70, Rm = 430...530 МПа, Re ≥ 240 МПа, A ≥ 26 %, Z ≥ 45 %, KV ≥ 28 Дж, 125...160 НВ
9ДКРН 50/110				
5 ДКРН 50/110				
9 ДКРН 74/160-2				
6 ДКРН 74/160-2				
7 ДКРН 50/110-2				
5 ДКРН 50/110-2				
6 ДКРН 75/160				
8 ДКРН 74/160-2				
6 ДКРН 74/160-3				
9 ДКРН 84/180-3				
5 ДКРН 62/140-3				
8 ДКРН 74/160-3				
9 ДКРН 80/160-4				
7 ДКРН 80/160-4				
7 ДКРН 80/160-4Л				
6 ДКРН 67/140-4				
6 ДКРН 67/170-7				
6 ДКРН 45/120-7				
7 ДКРН 67/170-7				
6 ДКРН 45/120-7Л				
8 ДКРН 60/195-10	Чугун «Таркаллой», Rm=215 МПа, 180...230 НВ. С 1996 года чугун «Таркаллой-С», Rm = 245 МПа, 180...230 НВ	Чугун «Убаллой», Rm = 245 МПа, E = (1,08...1,37)10 ⁵ МПа, 187...229 НВ	Сталь спец. углеродистая гр. III, ТУ 24-4-01-71-76 (до 1990 г.), Rm = 400...500 МПа, Re ≥ 206 МПа, A ≥ 26%, Z ≥ 45 %, 115...145 НВ	С 1985 по 1996 г. S44S ЭШП, Rm = 590...700 МПа, Re ≥ 310 МПа, A ≥ 19%, Z ≥ 35%, КСИ ≥ 44 Дж/см ² , 175...210 НВ.
6 ДКРН 42/136-10				
6 ДКРН 42/136-10Л				
6 ДКРН 60/195-10				
8 ДКРН 42/136-10				
8 ДКРН 60/229-12				
6 ДКРН 26/98-12				
6 ДКРН 35/105-10				
6 ДКРН 60/229-12				
8 ДКРН 60/229-13				
6 ДКРН 35/105-11	Чугун «Таркаллой-С», Rm = 245 МПа, 180...230 НВ		Сталь S18F (марочник фирмы), Rm = 400...500 МПа, Re > 205 МПа, A > 26%, Z > 45 %, KV > 35 Дж, 120...150 НВ	С 1996 года S34MnV ЭШП (кроме ДБ61, ДБ64), Rm = 650...830 МПа, Re ≥ 350 МПа, A ≥ 18 %, Z ≥ 40 %, KV ≥ 20 Дж, 180...240 НВ
6 ДКРН 60/229-13				
6 ДКРН 42/136-11				
6 ДКРН 60/195-11				
6 ДКРН 26/98-13				
8 ДКРН 60/229-13				
6 ДКРН 50/191-13				
5 ДКРН 42/136-11				
7 ДКРН 35/140-13				
6 ДКРН 50/200-14				
8 ДКРН 42/176-15	Чугун «Таркаллой-А», Rm = 270 МПа, 200...260 НВ		Сталь S20FX, Rm = 440...540 МПа, Re ≥ 260 МПа, A ≥ 22%, Z ≥ 30, KV ≥ 20 Дж, 130...160 НВ	
6 ДКРН 60/240-14				
7 ДКРН 60/240-14			Сталь S20FX, Rm = 440...540 МПа, Re ≥ 260 МПа, A ≥ 22%, Z ≥ 30, KV ≥ 20 Дж, 130...160 НВ	

Следует подчеркнуть, что изменение свойств и применение новых марок сталей и чугунов следовало за серьезными изменениями конструкции судовых МОД.

Значительным событием в истории отечественного дизелестроения стало освоение БМЗ производства двигателей типа 6ДКРН 50/200-14 компактной модификации (S50MC-C – обозначение «МБД», где S – супердлинноходовой двигатель; 50 – диаметр цилиндра, см; MC – версия дизелей, выпускавшихся с 1985 года, C –

компактный) (рис. 5).

По сравнению с предыдущими версиями двигателей с диаметром цилиндра 500 мм на этих двигателях примерно на 10 % увеличена мощность при снижении на 10 % длины и массы двигателя при неизменной частоте вращения коленчатого вала на номинальной мощности. Это достигнуто повышением среднего эффективного давления с 18 до 19 бар и увеличением хода поршня на 4,7 %.

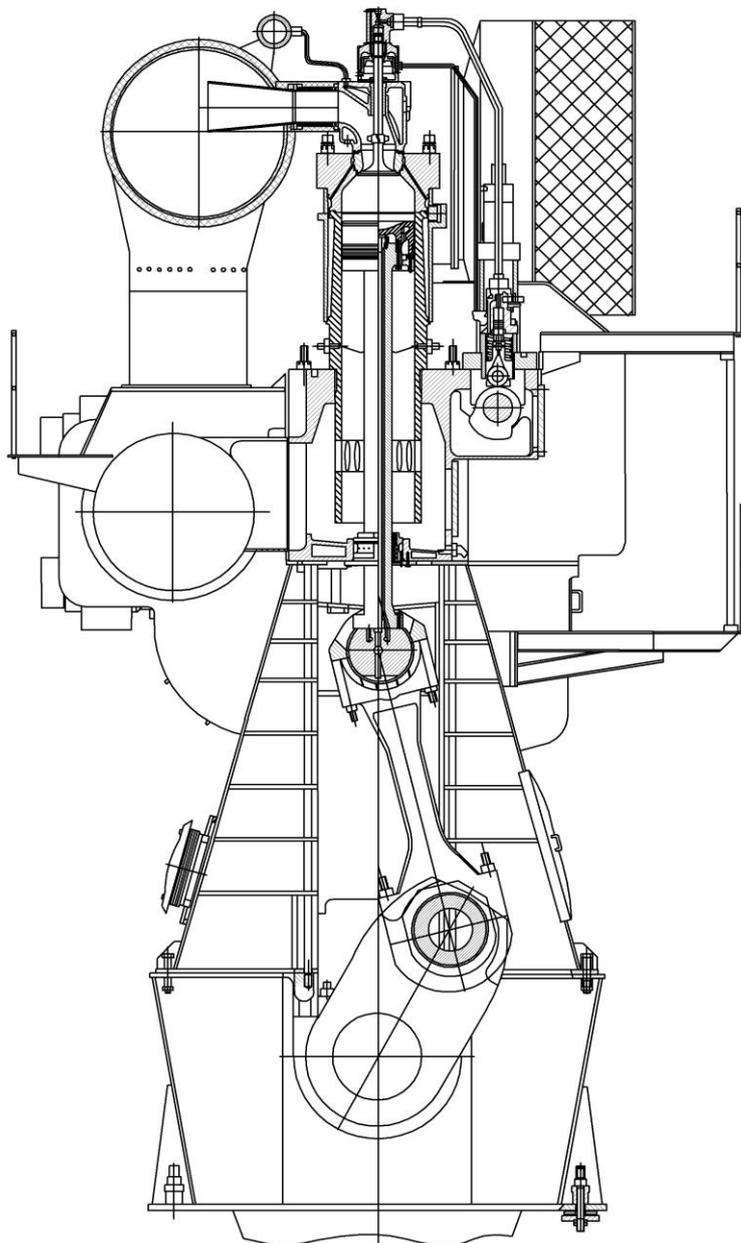


Рис. 5. Поперечный разрез дизеля 6ДКРН 50/200-14 (ДБ-62, S50MC-C)

Уменьшенные габариты двигателя привели к снижению его общей массы: компактный двигатель весит 207 т (против 225 т у прототипа), что соответствует удельному весу примерно 21 кг/кВт. Увеличение мощности потребовало серьезной модернизации конструкции двигателя, в связи с чем компоненты остова дизеля подверглись усовершенствованию с точки зрения жесткости и прочности. Основное новшество в конструкции остова – двойные анкерные связи: традиционная анкерная связь с каждой стороны от продольной оси двигателя заменена двойными короткими анкерными связями, крепящимися в верхней части постели фундаментной рамы (рис. 6).

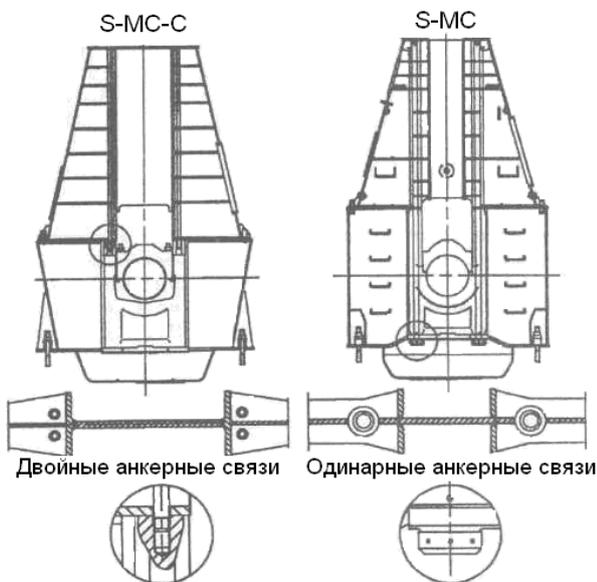


Рис. 6. Конструкция двойной анкерной связи

Это сделало конструкцию более простой и надежной, поскольку уменьшились деформации расточки рамовых подшипников и направляющих крейцкопфа, упростились сварка деталей остова и литье постелей рамовых подшипников.

Указанное изменение конструкции стало возможным с применением стали S20FX (по обозначению «МБД») с увеличенными механическими характеристиками ($R_m = 440... 540$ МПа, $Re \geq 260$ МПа).

Цилиндровая втулка – тонкого типа (рис. 7) с оптимизированным распределением температур на рабочей поверхности. Температура в нижней части втулки по-

вышена для противодействия холодной серно кислотной коррозии, что позволяет использовать цилиндры масла с относительно низким щелочным числом. Втулка изготавливается из высококачественного чугуна «Таркалло-С» (табл. 2). На рабочей поверхности втулки цилиндров с помощью специальной технологической операции «полухонингование» искусственно увеличивается шероховатость, чтобы дольше удерживать масляную пленку. Следствием является снижение износа втулки и увеличение периодов между переборками.

Высота цилиндрического блока уменьшена, он сконструирован без охлаждения водой, что исключает необходимость гидроиспытаний и упрощает отливку. Корпус распределительного вала выполнен заодно с блоком цилиндров. Крышка цилиндра аналогична конструкции прототипа (дизель 6ДКРН 50/191-13), за исключением того, что высота крышки увеличена из-за более низкого расположения поверхности стыка с цилиндрической втулкой. Поршень выполнен с высокой верхней частью и, следовательно, низко расположенными поршневыми кольцами, что положительно влияет на состояние цилиндра, поскольку кольца расположены на более холодном участке поршня и цилиндрической втулки. Это приводит к снижению тепловой нагрузки на кольца, улучшению рабочих условий для цилиндрического масла и, таким образом, повышению рабочих характеристик колец. Наивысшая термическая нагрузка воспринимается стальной цилиндрической крышкой, которая обладает более высокой термостабильностью, чем чугунная цилиндрическая втулка.

Поршень снабжен четырьмя поршневыми кольцами, причем высота двух верхних колец увеличена, что придает им более высокую термическую стабильность. Верхнее поршневое кольцо изготовлено из высоколегированного термостойкого чугуна, имеет двойное S-образное уплотнение внахлестку, являющееся практически газонепроницаемым, и шесть калиброванных разгрузочных канавок для контролируемо-

го сброса давления, в то время как остальные три кольца, изготовленные из менее легированного чугуна, выполнены с обычными косыми кромками. Разгрузочные канавки снижают термическую и механическую нагрузку на пакет колец, поскольку поток протечек газа распределяется по целому ряду каналов. Все поршневые кольца имеют алюминиево-бронзовое покрытие, снижающее время обкатки двигателя и приработки колец, в течение которого требуется повышенная подача масла в цилиндры. Таким образом, рабочие характеристики пакета поршневых колец существенно улучшены.

Снижение межцилиндрового расстояния с 890 мм (дизель 6ДКРН 50/191-13) до 850 мм (дизель 6ДКРН 50/200-14) наряду с увеличением диаметров шеек коленчатого вала, продиктованным ростом мощности, привело к существенному повышению его жесткости и прочности. Это позитивно отразилось на надежности рамных подшипников, поскольку существенно снизилось отклонение шеек коленчатого вала от расположения в линию при работе двигателя и тем самым уменьшилось давление на кромках подшипников, несмотря на увеличение максимального давления сгорания в цилиндре.

Что касается непосредственно самих подшипников коленчатого вала, то у двигателя S50MC-C все они имеют современную тонкостенную конструкцию, позволяющую применить вместо баббита более прочный материал, а именно малочувствительный к температуре оловоалюминиевый сплав, содержащий 40 % олова. Этот материал хорошо зарекомендовал себя в течение многих лет на других двигателях и всегда успешно применялся на двигателях типа 6ДКРН 50/191-13.

Резюмируя изложенное, можно уверенно прогнозировать, что с ростом степени форсировки дизелей механические характеристики сталей и чугунов будут уве-

личиваться за счет изменения химического состава материалов путем введения леги-

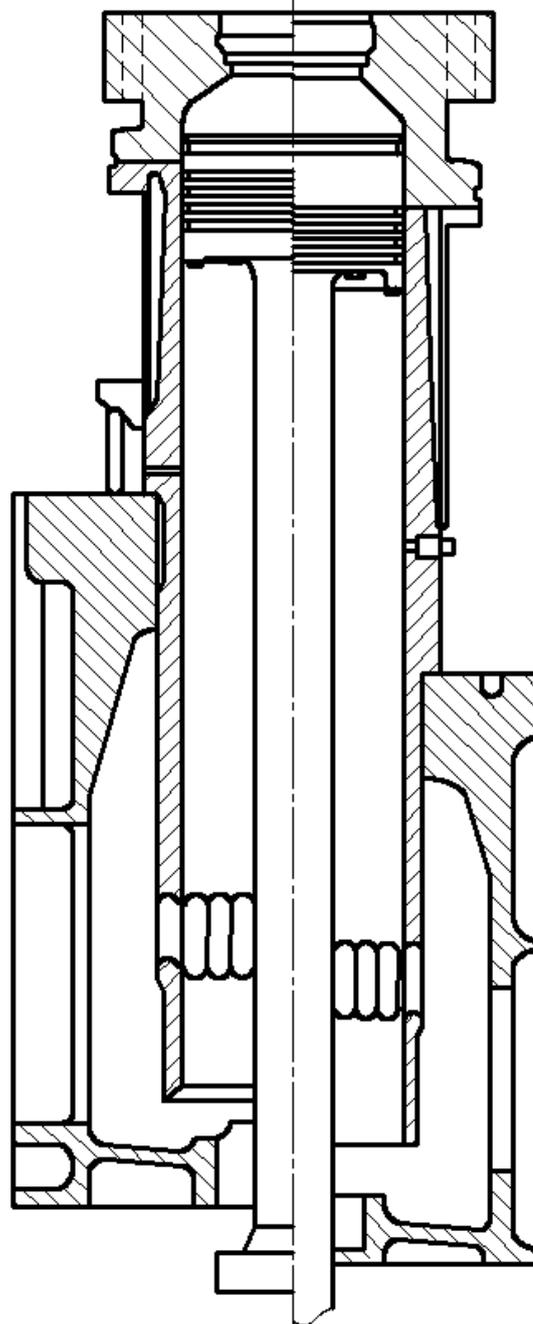


Рис. 7. Сравнение конструкций дизелей 6ДКРН 50/191-13 (слева) и 6ДКРН 50/200-14 (справа)

рующих элементов и использования современного металлургического оборудования для получения качественных заготовок.

*Материал поступил в редколлегию
29.06.15.*

*Рецензент: д.т.н., профессор
Брянского государственного технического
университета А.А.Обозов*

Сведения об авторах:

Рогалев Владимир Владимирович, к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Тепловые двигатели» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 58-82-30, e-mail: rogalevv@tu-bryansk.ru.

Rogalev Vladimir Vladimirovich, Can.Eng., Assistant Prof., Head of the Dep. «Heat Engines» Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 58-82-30, e-mail: rogalevv@tu-bryansk.ru.

Чернявский Олег Андреевич, к.т.н., доцент кафедры «Тепловые двигатели» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 58-82-30, e-mail: dvs@tu-bryansk.ru.

Chernyavsky Oleg Andreyevich, Can.Eng., Assistant Prof. of the Dep. «Heat Engines», Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 58-82-30, e-mail: dvs@tu-bryansk.ru.