

УДК 621.436

*Н.Я. Яхьяев, д-р техн. наук, Н.М. Вагабов, инж.*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ВТУЛОК ЦИЛИНДРОВ ПРИ СБОРКЕ ДИЗЕЛЯ 4С8,5/11

### Введение

В конструкциях большинства судовых дизелей втулки цилиндров, головки цилиндров, коленчатый вал с блок-картером образуют групповые резьбовые и пресовые соединения.

Каждая деталь, поступившая на сборку, до ее соединения в узел, как правило, имеет относительно высокие допуски на отклонения макрогеометрии, соответствующие требованиям нормативно-технической документации. Силы затяжки, передаваемые на детали через силовые шпильки, должны создавать равномерные контактные давления по всему периметру стыка деталей и обеспечивать надежность соединения деталей в узле. Однако это не всегда достижимо из-за неравномерной конструктивной жесткости по периметру опорных буртов блоков цилиндров, неточности усилий затяжки, погрешностей размеров и формы, допущенных при изготовлении сопрягаемых деталей и усиливающих отклонения точности детали в собранном узле и др.

Неравномерные упругие деформации по периметру гнезд передаются на опорные бурты втулок цилиндров (ВЦ) и являются фактором неравномерной деформации в узле, что приводит к искажениям геометрической формы рабочих поверхностей цилиндров, и, соответственно, ухудшают условия работы маслосъемных и компрессионных колец. Кроме того, этим сводятся к минимуму усилия технологов по обеспечению высокой точности формы цилиндров на операциях механической обработки цилиндров, т.к. после сборки ДВС отклонения геометрической точности цилиндров возрастают в несколько, а иногда и в десятки раз [1]. Большая часть работ, направленных на исследование отклонений макрогеометрии гильз цилиндров и влияния их на эксплуатационные показатели, посвящена тепловозным, автомобильным и тракторным двигателям. Для судовых дизелей отдельные работы в данном направлении выполнены в СПб ГМТУ, СПб ГУВК, НИИВТ, Гипрорыбфлоте, ДГТУ и др.

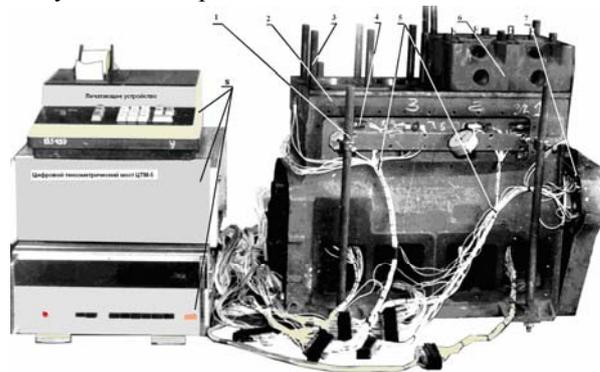
Недостаточная изученность отклонений макрогеометрии цилиндров после сборки ДВС объясняется труднодоступностью измерений при контроле точности. Поэтому, разработка и исследование новых эффективных методов измерения на-

пряжений и деформаций втулок цилиндров, от точности геометрической формы которых зависят показатели работоспособности ДВС, является актуальной задачей для инженерной практики.

**Постановка задачи.** Из-за трудностей измерения деформации ВЦ в процессе сборки ДВС (отсутствует доступ к поверхностям для контактных измерительных инструментов, применяемых в производстве), объективную информацию о характере и величинах деформаций можно получить лишь на основе лабораторных экспериментальных исследований. Научный и практический интерес представляют разработка и апробирование методики измерения деформации ВЦ.

**Методы испытаний.** Общий вид экспериментальной установки, созданной на базе дизеля 4С8,5/11, показан на рис.1.

Экспериментальная установка состоит из цифрового тензометрического моста ЦТМ-5, записывающего устройства (ЗУ) к нему, тензорезисторов и позволяет контролировать напряженно-деформированное состояние одновременно в 56 точках на исследуемых поверхностях блок-картера и втулок цилиндров.



*Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки  
1 – штатив с индикаторной головкой; 2 – блок-картер дизеля; 3 – шпилька крепления головки цилиндров к блок-картеру; 4 – тензорезистор; 5 – провода от тензорезисторов; 6 – головки цилиндров; 7 – место наклейки компенсационных тензорезисторов; 8 – комплект измерительной аппаратуры (ЦТМ-5)*

В работе использовали тензорезисторы на бумажной основе типа ПКБ.10.100Х с базой 10мм. Статическое тарирование датчиков проводилось на балках равного сопротивления, изготовленных из материала блока и втулок цилиндров.

Точность измерения напряжений составляло  $\pm 0,6$  МПа. Деформации втулок и блока измерялись индикаторными головками с ценой деления 0,001 мм. Напряжения и деформации регистрировались при сборке блока с втулками цилиндров и коленчатым валом. Затяжка шпилек крепления опор коленчатого вала осуществлялась моментом  $M_{\text{зат}} = 100$  Н·м и шпилек крепления головок цилиндров —  $M_{\text{зат}} = 200$  Н·м. Последовательность и моменты затяжки соответствовали техническим условиям на сборку серийных дизелей 4С8,5/11.

Для повышения точности результатов измерений и уменьшения влияния случайных погрешностей каждое измерение повторяли трижды. Окончательный результат определялся, как математическое ожидание этих измерений. Обработка экспериментальных данных заключалась в определении приращения напряжений по сравнению с исходными показателями (перед каждой операцией сборки). Анализ погрешностей позволил оценить их суммарную величину при проведении опытов, не превышающую  $\pm 6\%$ . На рис. 2 показан общий вид размещения тензорезисторов в исследуемом групповом резьбовом соединении (ГРС).



Рис. 2 Общий вид размещения тензорезисторов в ГРС дизеля 4С8,5/11

Жесткость исследуемого ГРС формируется путем интегрирования характеристик жесткости каждой детали входящей в соединение, а также напряженно-деформированного состояния, возникающего в прессовых и резьбовых соединениях узла.

Поэтому, научно-практический интерес представляет процесс формирования жесткости в результате сборки узлов:

- блок-картер – головки цилиндров – коленчатый вал (без ВЦ);
- блок-картер – головки цилиндров – втулки цилиндров – коленчатый вал.

Такая последовательность проведения экспериментов позволяет определить технологическую

наследственность процессов образования и наследования погрешностей формы деталей ГРС.

Для определения степени влияния последовательности сборки на деформацию ВЦ дизеля на первом этапе были выполнены исследования характера напряженно-деформированного состояния блок-картера, изменения формы и размеров его посадочных поясков при сборке без ВЦ, а на втором этапе — НДС исследуемого узла, но уже с установленными ВЦ. На втором этапе измерялись также деформации и напряжения на зеркале ВЦ. Принятая методика проведения экспериментов позволила исследовать основные операции сборки с учетом технологической наследственности.

#### Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 3 показано изменение напряжений на посадочных поясках блок-картера в зависимости от момента затяжки гаек крепления головок цилиндров и опор коленчатого вала. Как видно, наибольшая неравномерность напряженного состояния наблюдается в верхних поясках второго и третьего цилиндров блока ( $\Delta\sigma_{\text{max}}^{(2)} = 31,5$  МПа;  $\Delta\sigma_{\text{max}}^{(3)} = 50,6$  МПа). Причем большее влияние на деформацию посадочных поясков оказывает затяжка шпилек крепления опор коленчатого вала, меньшее – затяжка шпилек при соединении блока с головками цилиндров. Для этих цилиндров также характерна наибольшая неравномерность деформации поясков, так овальность их достигает 0,08 мм (третий цилиндр) с расположением большей оси овала в плоскости качания шатуна.

Исследованы напряжения на рабочих поверхностях втулок цилиндров, возникающие при различных операциях сборки: после установки ВЦ в блок-картер, после затяжки шпилек крепления головок цилиндров и крепления опор коленчатого вала. На рабочих поверхностях ВЦ напряжения, а следовательно их упругие деформации неравномерны сразу после установки в блок-картер ( $\Delta\sigma_{\text{max}}^{(1)} = 16$  МПа, для первого цилиндра в верхнем пояске). Однако большее влияние на возникновение неравномерной деформации ВЦ оказывают усилия затяжки шпилек головок цилиндров (до  $\Delta\sigma_{\text{max}}^{(1)} = 20$  МПа, для первого цилиндра в верхнем пояске) и опор коленчатого вала (до  $\Delta\sigma_{\text{max}}^{(3)} = 49,2$  МПа, для третьего цилиндра в верхнем пояске).

Все ВЦ после сборки деформируются неравномерно и характер их деформации соответствует данным, полученным при статистическом анализе результатов измерения втулок серийных дизелей и

результатов предварительных расчетов. Овальность ВЦ находилась в пределах от 0,005 до 0,035мм при наибольших значениях в третьем и втором цилиндрах. Большие оси овалов располагаются в плоскости качания шатуна, т.е. совпадают с направлением овальности посадочных поясков блока при их измерении без втулок. Сравнение полученных результатов позволило сделать вывод о том, что на деформацию втулок цилиндров большее влияние оказывает искаженная форма отверстий посадочных поясков, с которыми сопрягается цилиндрическая втулка, а деформация ВЦ от приложения изгибающего момента  $M_{изг}$  к опорному торцу менее значительна.

Анализ результатов исследования сборки ди-

зеля с втулками цилиндров и без них показал значительное влияние жесткости самих ВЦ на качество сопряжения Б-Г-ВЦ. Так, наибольшая овальность отверстий ВЦ составляет 0,035мм, в то время как овальность посадочных поясков блок-картера, с которыми сопрягаются втулки, была 0,08мм. Кроме того, наибольшая интенсивность деформации ВЦ возникает при затяжке силовых шпилек до величины  $M_{зат}=50Нм$ . Дальнейшее увеличение  $M_{зат}$  с 50Нм до 200Нм оказывает заметное влияние на деформацию втулок лишь в зоне верхних посадочных поясков блока. В зоне нижних посадочных поясков блока деформация втулок незначительна – овальность увеличивается только на 0,005мм.

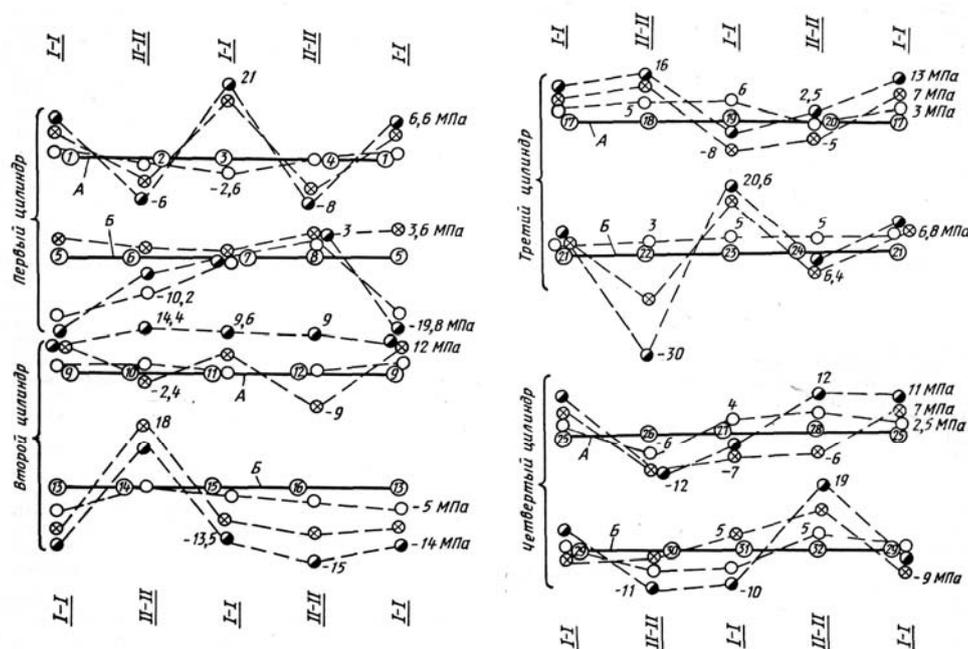


Рис. 3 Напряжения на посадочных поясах блок-картера в сопряжении блок-картер – головки – коленчатый вал дизеля 4Ч8,5/11

○⊗ - после затяжки опор коленчатого вала; ● - после затяжки головок цилиндров; ○ - после затяжки коленчатого вала и головок цилиндров

Можно заключить, что втулки цилиндров деформируются от усилий затяжки силовых шпилек главным образом до тех пор, пока поверхности сопрягаемых деталей будут полностью прилегать друг другу, т.е. до полной выборки всех технологических зазоров между деталями. Следовательно, искажение базовых поверхностей посадочных поясков блок-картера от сил затяжки резьбовых шпилек ГРС является одним из факторов, определяющих характер деформации втулок цилиндров.

Аналогичные исследования были выполнены также на дизеле 4Ч9,5/11, имеющем похожую силовую схему ГРС.

Анализ полученных данных о погрешностях формы ВЦ при сборке показывает влияние сил за-

тяжки ГРС на формирование характера и величин отклонений. Рекомендации, сделанные для дизеля Ч8,5/11 могут быть использованы также в технологическом процессе изготовления и сборки дизеля 4Ч9,5/11.

Результаты проведенных испытаний показали, что одним из постоянно действующих факторов, влияющих на неравномерную деформацию ВЦ при сборке является неравномерная деформация посадочного пояса блок-картера из-за переменной жесткости его верхней опорной плиты. Для повышения геометрической точности ВЦ был разработан способ, основанный на исправлении погрешностей формы базовых поверхностей поясков блока на операциях механической обработки. Практиче-

ская реализация данного способа заключается в следующем:

- блок цилиндров, соединенный с технологическим коленчатым валом, поступает на операцию чистовой расточки отверстий; момент затяжки опор этого вала  $M_{зат}=100$  Н·м, соответствующий техническим требованиям (ТТ) на сборку дизеля, приводит к деформациям блока и его посадочных поясков;

- производят чистовую расточку поверхностей посадочных поясков и тем самым исправляют их форму, искаженную деформациями блока;

- блок с отверстиями подается на сборку; после снятия технологического вала отверстия в блоке приобретают форму обратную той, которая возникает у них при сборке дизеля;

- окончательно собирают узел блок-картер – втулки цилиндров – коленчатый вал – головки цилиндров, в котором преднамеренно искаженная форма отверстий блока выполняет роль компенсатора его неравномерной сборочной деформации от усилий затяжки подшипников коленчатого вала и уменьшает деформации.

Использование описанного способа обработки и сборки дизеля 4С8,5/11 позволило уменьшить неравномерность деформаций втулок цилиндров с 0,035 мм до 0,015мм, т. е. более чем в 2 раза.

Выполненные исследования влияния сил и последовательности затяжки шпилек ГРС на деформацию втулок цилиндров хорошо согласуются с результатами исследований, выполненных для автомобильных двигателей А.Г. Кесарийским [2]. Используемые им лазерно-интерференционные методы позволили измерить и представить картину перемещений не только в виде пространственных полей, но и в виде временных последовательностей.

Учитывая фактор влияния последовательности и сил затяжки шпилек ГРС на формирование точности формы цилиндров, представляет интерес более подробное исследование вопроса о возможности применения заданного уровня неравномерности затяжки в целях управления НДС исследуемого узла, что открывает новые технологические возможности повышения точности сборки ГРС без внесения изменений в его конструкцию..

#### **Заключение**

Выполненное исследование точности и механической напряженности втулок цилиндров и блок-картера в процессе сборки судовых малоразмерных дизелей позволило сделать следующие выводы:

1. Разработанная методика исследования на-

пряженно-деформированного состояния рассматриваемого ГРС, основанная на тензометрировании деформаций и напряжений показала свою эффективность и информативность. Погрешность измерений не превысила 8%.

2. Влияние на деформацию ВЦ оказывает как затяжка крепежа головок цилиндров, так и опор коленчатого вала. Все ВЦ после сборки деформируются неравномерно и характер их деформации соответствует данным, полученным при статистическом анализе результатов измерения втулок серийных дизелей и результатов предварительных расчетов.

3. Овальность втулок находилась в пределах от 0,005 до 0,035мм при наибольших значениях в третьем и втором цилиндрах. Большие оси овалов располагаются в плоскости качания шатуна, т.е. совпадают с направлением овальности посадочных поясков блока при их измерении без втулок.

4. На деформацию втулок цилиндров большее влияние оказывает искаженная форма отверстий посадочных поясков, с которыми сопрягается цилиндрическая втулка, а деформация втулки от приложения изгибающего момента  $M_{изг}$  к опорному торцу менее значительна.

5. Анализ результатов исследования сборки дизеля с втулками цилиндров и без них показал значительное влияние жесткости самих втулок на деформацию деталей сопряжения блок-картер – головки цилиндров – втулки цилиндров.

6. Втулки цилиндров деформируются от усилий затяжки крепежа главным образом до тех пор, пока поверхности сопрягаемых деталей полностью прилегают друг другу, т.е. до полной выборки всех технологических зазоров между деталями.

7. Для повышения геометрической точности ВЦ разработан новый способ, основанный на исправлении погрешностей формы базовых поверхностей поясков блока на операциях механической обработки, что позволило уменьшить неравномерность деформаций втулок цилиндров с 0,035 мм до 0,015мм, т. е. более чем в 2 раза.

#### **Список литературы:**

1. Яхьяев Н.Я. Повышение геометрической точности рабочих поверхностей втулок цилиндров при сборке малоразмерного судового дизеля / Н.Я. Яхьяев, С.Н.Яхьяева //Сборка в машиностроении и приборостроении. – 2005. – №6. – С.32–42.
2. Кесарийский А. Г. Разработка лазерно-интерференционных средств исследования напряженно- деформированного состояния деталей и узлов ДВС : автореф. ... канд. техн. наук. 05.05.03. Х.; Павлоград, 2005. — 21 с.