

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРЫШКИ ЦИЛИНДРА ФОРСИРОВАННОГО СРЕДНЕОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ

*Н.Д. Чайнов д.т.н., профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана
М.А. Салтыков, М.И. Раенко, С.П. Мягков; ОАО «Коломенский завод»*

Крышка цилиндра двигателя испытывает температурные и механические, монтажные и технологические напряжения.

Рост форсировки дизелей требует уточнения и обоснования допустимых значений остаточных напряжений.

Разработанная математическая модель и метод расчета позволяют осуществлять оценку конструктивных мероприятий на протяжении жизненного цикла изделия.

Крышка цилиндра форсированного среднеоборотного дизеля относится к ответственным деталям цилиндропоршневой группы, во многом определяющей ресурс двигателя в целом. Крышка современного дизеля характеризуется сложной геометрией и тяжелыми условиями работы (высокие температуры и давления в цилиндре, высокие скорости газовых потоков и их агрессивное воздействие на материал конструкции). При работе двигателя на крышку одновременно действуют циклические температурные и механические (от сил давления газов), статические монтажные и технологические (остаточные) напряжения. Температура огневого днища крышки со стороны камеры сгорания может превышать 400 °С, кроме того, огневое днище имеет неравномерное распределение температур по радиусу и толщине (перепад температур превышает 100 °С). Основным видом нагружения крышки цилиндра являются температурные воздействия, возникающие из-за неравномерного нагрева днища в осевом и радиальном направлениях в условиях несвободного расширения его элементов (межклапанных перемычек) при работе двигателя. Основным видом повреждений конструкции крышки являются трещины в огневой плите. Чаще всего трещины образуются в перемычках (между выпускными каналами, впускным и выпускным каналами, выпускным каналом и отверстием под распылитель топливной форсунки), которые являются наиболее нагретыми и нагруженными элементами крышки цилиндра [1, 3, 4].

Принимая во внимание сложность конструкции и высокие требования к точности геометрических параметров крышки, фактически

единственным способом получения заготовки является отливка. Кроме того, высокие показатели рабочего процесса (высокие температуры и давления в цилиндре) среднеоборотных дизелей фактически определяют использование в качестве конструкционного материала крышки серых и высокопрочных чугунов (с шаровидной формой графита), легированных для повышения прочностных характеристик. Для крышки цилиндра температурные напряжения являются определяющими по уровню и характеру разрушающего воздействия на материал, поскольку накопление повреждений и развитие трещин происходит всегда в наиболее нагретых элементах ее конструкции. Влияние других составляющих напряженно-деформированного состояния конструкции крышки, таких как монтажные усилия от затяжки силовых шпилек и рабочих напряжений от сил давления газов в цилиндре, относительно невелико.

Максимальный уровень температурных напряжений сжатия может достигать $\sigma_{r \max} = 3000\text{--}3500 \text{ кг/см}^2$, что превышает условный предел текучести применяемого материала (легированного высокопрочного чугуна). Возникающие в наиболее нагретых зонах сжимающие напряжения непосредственно не могут приводить к повреждению конструкции, выполненной из высокопрочного чугуна. Опасность появления повреждений в структуре металла и развития трещин возникает по мере возрастания в конструкции остаточных растягивающих напряжений, которые появляются в результате работы материала в зоне упругопластического деформирования. Пластические деформации от сжатия в горячем состоянии уменьшают начальную длину элемента перемычки при переходе конструкции в холодное состояние и обуславливают тем самым появление остаточных напряжений обратного знака (растяжение). Кроме того, при нагреве предел пропорциональности материала снижается, что вызывает эффекты текучести и релаксации исходных термоупругих напряжений. Повторяемость циклов и выдержка конструкции при высокой температуре приводит к накоплению остаточных растягивающих напряжений, что говорит о приближении конструкции к опасному состоянию. Для хрупких материалов, не имеющих относительного

удлинения, например серых чугунов, при малом числе теплосмен возможно разрушение от напряжений растяжения в виде статического разрыва. Для таких материалов, как высокопрочный чугун, разрушения в этих условиях имеют усталостный характер в виде термической (малоцикловой) усталости только при относительно большом числе циклов теплосмен (10^4 – 10^5 циклов). Такой тип разрушений характерен для крышек цилиндров тепловозных двигателей, отличающихся большим количеством смен режимов работы, вызывающих изменение теплового состояния деталей ЦПГ, в частности, для форсированных среднеоборотных тепловозных дизелей типа ЧН26/26, выпускаемых Коломенским заводом.

Анализ реальных условий нагружения и достигаемой долговечности конструкции крышки цилиндра в условиях переменности режимов работы двигателя показывает, что характерной особенностью этой детали является наличие в ней возникающих размахов температурных напряжений, превышающих располагаемый предел выносливости применяемого материала в 1,2–1,5 раза. Это говорит о том, что для крышек цилиндров остается недостижимым запас прочности по выносливости, который остается меньше единицы. Реально обеспечивается только запас по долговечности, представляющий собой отношение числа циклов до разрушения к числу циклов, выдерживаемых конструкцией в эксплуатации за заданный срок службы ($n_g = N_{пр} / N_p$).

Как упоминалось ранее, крышка цилиндра является одной из наиболее сложных и теплонагруженных деталей, образующих камеру сгорания. Характер теплообмена на поверхностях детали носит чрезвычайно сложный характер, и даже приближенное его описание требует использования практически всех видов граничных условий. По данным многочисленных экспериментов температурное состояние крышки и других деталей камеры сгорания на установившемся режиме работы двигателя имеет неизменный во времени характер. Следовательно, температурное состояние поверхности крышки на установившемся режиме можно считать стационарным. Для решения уравнения стационарной теплопроводности необходимо знать граничные условия. При моделировании стационарного температурного поля и напряженно-деформированного состояния (НДС) крышки цилиндра двигателя Д49 (ЧН26/26) в качестве граничных условий со стороны выхлопных газов используются условно стационарные граничные условия III рода — $\alpha_{ср}$ коэффициент теплоотдачи (средний за цикл) и $T_{рез}$ — средняя результирующая температура газа.

Решение задачи теплопроводности и последующий анализ НДС осуществляется методом конечных элементов (МКЭ) в трехмерной постановке. Перед построением конечно-элементной модели средствами программного комплекса Solid Works или Solid Edge создается так называемая объемная твердотельная модель крышки. После создания твердотельной модели она импортируется в расчетный комплекс ANSYS или NASTRAN для непосредственного моделирования теплового и НДС крышки цилиндра с помощью МКЭ.

Принятая расчетная модель крышки цилиндра дизеля типа ЧН26/26 показана на рис. 1. Результаты расчета температурного поля крышки при цилиндровой мощности $P_{цил} = 375$ л. с. представлены на рис. 2.

Опыт эксплуатации двигателей типа ЧН26/26 показал, что для определения располагаемого ресурса и опережающей оценки темпа приближения крышек цилиндров к опасному состоянию необ-

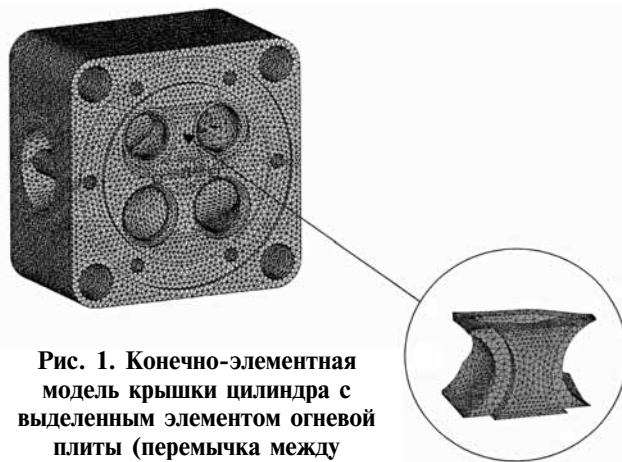


Рис. 1. Конечно-элементная модель крышки цилиндра с выделенным элементом огневой плиты (перемычка между клапанами)

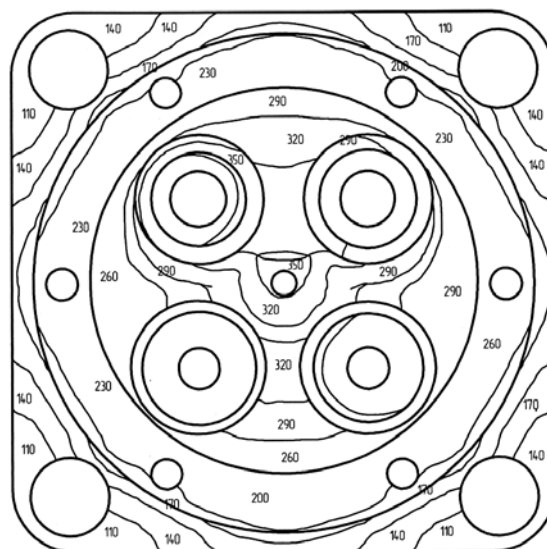


Рис. 2. Температурное поле крышки при цилиндровой мощности 185 кВт

ходимо проводить периодический контроль уровня остаточной напряженности в них путем отбора из эксплуатационных партий (не менее 2 шт.) последовательно с интервалом пробега ~ 50 000 км в однородных группах тепловозов. Допустимым уровнем остаточного напряжения для обеспечения заданного пробега тепловозов (1,2–1,5 млн км) при планируемой частоте отказов крышек цилиндров до ТРЗ в пределах 3 % принято считать $\sigma_{ост} \leq 2000$ кг/см² (после 300 000 км пробега) [8]. Сказанное относится к крышкам цилиндров тепловозных дизелей с цилиндровой мощностью до 250 л. с. При более высоких уровнях форсирования возможен иной темп роста остаточных напряжений в эксплуатации, что требует дальнейшего уточнения и обоснования их допустимых значений.

Основным методом определения остаточных напряжений в крышках является метод освобождения, относящийся к механическим разрушающим методам. Сущность метода заключается в освобождении (разрезке) элементов огневой плиты и измерении в них деформаций с помощью предварительно наклеенных на каждый выделенный элемент тензорезисторов. Остаточные деформации равны по величине и обратные по знаку измеренным деформациям. Неразрушающие методы контроля (рентгеновский, оптический, магнитный, ультразвуковой и др.), несмотря на сравнительную простоту и меньшую трудоемкость, не получили широкого применения вследствие недостаточной достоверности, особенно для чугунных деталей сложной формы. Высокая стоимость доставляемых после эксплуатации или снятых с производства крышек цилиндра для определения остаточных напряжений разрушающим методом и практическое отсутствие надежных неразрушающих методов контроля делает весьма актуальной задачу расчетной оценки уровня и темпа их роста на стадии проектирования и доводки дизеля.

Как уже отмечалось, в условиях работы крышки на двигателе процесс деформирования материала от действия температурных нагрузок в наиболее нагруженных районах имеет упругопластический характер. Решение упругопластической задачи при конечно-элементном представлении всей крышки в целом представляется проблематичным даже с учетом высокого уровня современных вычислительных методов и средств. В этой связи предлагается поэтапное решение поставленной задачи. На начальном этапе проводится расчет НДС всей конструкции крышки цилиндра в упругой постановке. На последующем этапе выполняется отдельное рассмотрение наиболее нагруженного элемента огневой плиты крышки, в частности, перемычки между выпускными

клапанами. Далее производится перенос выделенной расчетной модели в среду MSC Marc с автоматическим перестроением (сгущением) конечно-элементной сетки для решения упругопластической задачи. Результаты первого этапа расчета используются для задания нагрузок (температурных полей) и граничных условий в местах отделения от основной конструкции на втором этапе.

В связи с необходимостью пошагового нагружения при упругопластическом расчете задание граничных условий в виде заданных перемещений или реактивных усилий в местах отделения требует определения и задания указанных величин на каждом шаге нагружения, что приводит к существенному усложнению задачи. Более простым способом является моделирование граничных условий с помощью упругих элементов (типа пружин), жесткость которых определяется степенью стеснения деформаций конструкции. Коэффициент стеснения равен: $K = 1 - l / l_0$, где l — фактическое перемещение конструкции в месте условного разреза; l_0 — свободное перемещение отделенной части конструкции в том же месте.

Коэффициент K для различных типов конструкции различен и меняется от 0 для свободно расширяющегося элемента до 1 при абсолютно жесткой заделке. В отдельных случаях коэффициент K может превышать 1 (сверхстеснение) [5, 9], что возможно при соединении перемычки с более жестким и одновременно более нагретым элементом конструкции, в частности, в районе отверстия под форсунку. По результатам первого этапа расчета определяются величины l по 3-м направлениям возможных перемещений в каждой узловой точке условного разреза, на втором этапе вычисляются свободные перемещения l_0 в тех же узлах по 3-м направлениям. Далее вычисляются коэффициенты K в граничных узловых точках, которые используются для задания жесткости упругих элементов, моделирующих силовое взаимодействие между выделенной перемычкой и остальной крышкой в составе реальной конструкции. Модель (рис. 1) является исходной для решения упругопластической задачи средствами расчетной программы MSC Marc, специально предназначенной для решения нелинейных задач и осуществления анализа НДС конструкции с учетом истории циклического нагружения.

Исходными данными для упругопластического являются диаграммы деформирования материала (зависимости σ от ϵ) при разных уровнях температур с некоторым шагом (через 50–100 °С) в их рабочем диапазоне изменения. Учитывая циклическую анизотропию (неодинаковость прочностных показателей при растяжении и сжатии), свойственную чугунам, указанные диаграммы

необходимо задавать как в области растяжения, так и в области сжатия. В качестве примера на рис. 3 показана диаграмма деформирования высокопрочного чугуна ВПЧ-НМ, применяемого для крышек цилиндров двигателей типа ЧН26/26, построенная для $t = 20-100^\circ$ по данным [3]. Решение упругопластической задачи осуществляется методом пошагового нагружения (по температурам) с использованием в качестве критерия текучести — критерия Мизеса и автоматическим регулированием шага в расчетной программе. При достижении в наиболее нагруженном участке (участках) конструкции указанного критерия начинается решение нелинейной задачи в пластической области с использованием метода Ньютона–Рафсона или его модификаций (метод переменных параметров упругости).

Далее производится разгрузка с переходом в область растягивающих напряжений. В случае необходимости возможен учет эффекта Баушингера, который заключается в снижении сопротивления пластическому деформированию материала при повторном нагружении в направлении, противоположном первичному пластическому деформированию. По полученной кривой деформирования можно определить уровень остаточных напряжений растяжения от воздействия первых термоциклов. Полученные данные могут быть использованы для прогнозирования ресурса детали. Если уровень остаточных напряжений в течение первых циклов нагружения стабилизируется, то с достаточной степенью достоверности можно говорить о том, что конструкция будет работать в области приспособляемости (квазиупругой), и накопление остаточных напряжений будет происходить в основном за счет релаксации напряжений при выдержке на максимальных (или близких к ним) температурах цикла. Данные по релаксации напряжений позволяют принять во внимание этот эффект, что позволяет расчетным методом получать уровень остаточных напряжений в конструкции после продолжительного времени ее работы.

Таким образом, предлагаемая модель крышки позволяет при существующем уровне вычислительной техники производить расчет НДС (в частности остаточных напряжений) с приемлемой для практических целей точностью. Упрощение модели путем выделения наиболее нагруженного элемента позволяет более рационально и эффективно использовать машинные ресурсы и прорабатывать большее количество конструкторских решений за более короткие сроки, что особенно актуально в современном дизелестроении. Предложенный метод может быть эффективно использован для оценки введения конструктивных мероприятий по увеличению долговечности конструкции. Кроме того, расчет Чайнов Н.Д., Салтыков М.А., Раенко М.И., Мягков С.П.

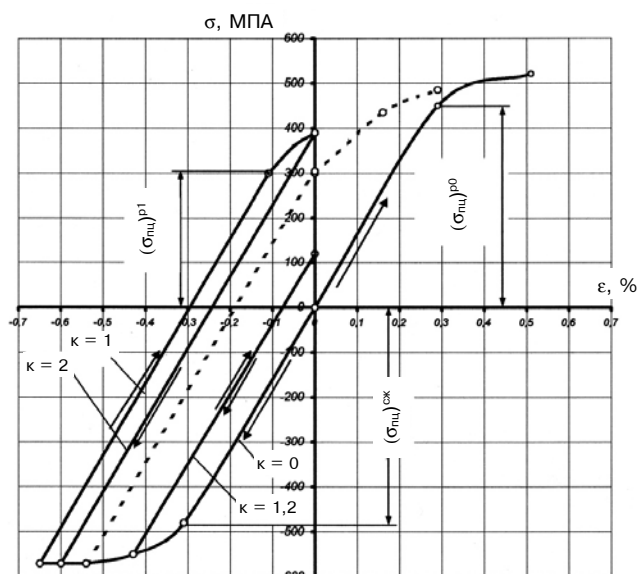


Рис. 3. Диаграмма упругопластического деформирования высокопрочного чугуна

может производиться на различных этапах развития конструкции: начиная от этапа проектирования и заканчивая эксплуатацией. Имея предварительные данные по тепловому состоянию крышки, можно вносить конструкторские улучшения на этапе проектирования, где их можно осуществить наиболее быстро и эффективно, а также при доводочных работах и в эксплуатации.

Литература

1. Орлин А.С., Круглов М.Г. Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей. — М.: Машиностроение 1984. — С. 28–51, 320–356.
2. Александров И.И. Исследование условий термической прочности литых материалов для деталей камеры сгорания транспортных дизелей: Диссертация канд. техн. наук. — Коломна, 1972. — 196 с.
3. Чайнов Н.Д., Заренбин В.Г., Иващенко Н.А. Тепломеханическая напряженность деталей двигателей. — М.: Машиностроение, 1977. — 153 с.
4. Чайнов Н.Д., Салтыков М.А., Раенко М.И., Сальников М.А. Разработка и применение моделей разных уровней для расчета рабочих напряжений в крышках цилиндров транспортных дизелей // Двигателестроение. — 1987. — № 4. — С. 10–14.
5. Ивин В.И., Грехов Л.В. Теплообмен в выпускном канале ДВС при закрытом клапане // Двигателестроение. — 1987. — № 4. — С. 3–6.
6. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. — М.: Атомиздат, 1979. — 416 с.
7. Methods for simplified thermal stress estimation and fatigued life analysis of a grey cast iron cylinder cover in a medium speed diesel engine. Takao, S. Suzuki, M. Nagai-Hitachi Zocen Techn. Rev., 1981, 1, p. 35–46.
8. Салтыков М.А., Сальников М.А. Оценка сопротивления разрушению чугуна с шаровидной формой графита при температурных циклических нагрузках для прогноза ресурса деталей цилиндропоршневой группы двигателей транспортного назначения // Двигателестроение. — 1983. — № 6. — С. 35–38.