

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ РАСЧЕТЕ СОПРЯЖЕНИЙ БАЗОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Н.Д. Чайнов, А.Н. Краснокутский, А.В. Капшуков  
МГТУ им. Н.Э. Баумана*

Выполнено исследование различных возможностей представления резьбовых соединений в расчетных моделях узла крышка цилиндра—втулка и корпуса поршневого двигателя. Проведен расчет резьбового соединения корпусных деталей двигателя в осесимметричной и трехмерной постановке.

Прочность и надежность конструкции поршневых двигателей внутреннего сгорания во многом определяется работой многочисленных резьбовых соединений, являющихся составной частью конструкции двигателя [1]. Это особенно актуально применительно к современным высокофорсированным среднеоборотным дизелям [2] с максимальным давлением газов в цилиндре, достигающем 180 бар и выше. Речь идет в первую очередь о резьбовом соединении деталей, образующих газовый стык двигателя, а также о составном поршне, шатуне и коленчатом вале.

При расчете напряженно-деформированного состояния базовых узлов и деталей двигателя, включающих резьбовые соединения, используется метод конечных элементов (МКЭ) [3]. В конструкциях с подвесной втулкой [4] важное значение [5] имеет адекватное описание работы резьбового соединения сборки втулки цилиндра и шпилек, крепящих крышку цилиндра и образующих вместе с прокладкой газовый стык двигателя [6].

Для оценки напряженно-деформированного состояния при вворачивании шпилек в верхнем поясе втулки использована трехмерная конечно-элементная модель сборки втулки с заменой контактного взаимодействия в резьбовом соединении крепления шпильки со втулкой «склеиванием» (glue). «Склеивание» (совмещение границ объемов) используется для создания модели, состоящей из соприкасающихся (смежных) объектов, путем наложения ограничений в зоне стыков (взаимодействий). Такой прием может использоваться только для моделей с малыми перемещениями.

При создании конечно-элементной модели наибольшее внимание уделяется точности опи-

сания геометрии верхнего пояса втулки, что требуется при построении объемной модели узла втулка—крышка цилиндра.

Перед построением конечно-элементной модели была создана так называемая «твердотельная» объемная модель в среде программного комплекса «SolidWorks», который позволяет эффективно создавать модели достаточно сложной формы. Созданная твердотельная модель переносится в расчетный комплекс ANSYS для непосредственного моделирования напряженно-деформированного состояния сборки втулки с крышкой цилиндра. Такой подход обеспечивает возможность оперативного изменения любых геометрических размеров с автоматической регенерацией всей расчетной модели. Последнее обстоятельство особенно важно для сокращения времени при оптимизационных расчетах [7].

На рис. 1 представлена твердотельная расчетная модель втулки цилиндра двигателя ЧН26/26 с ввернутыми шпильками.

При расчете напряженно-деформированного состояния резьбового соединения втулка—шпилька усилие затяжки моделировалось давлением, прикладываемым к поперечным сечениям шпилек. Осевое усилие для одной шпильки принималось равным  $1,0 \cdot 10^5 \text{ Н}$ .

На рис. 2 представлена конечно-элементная модель втулки цилиндра в сборе со шпильками, обеспечивающими герметичность газового стыка.

Для подтверждения допустимости применения «склеивания» при расчете взаимодействия

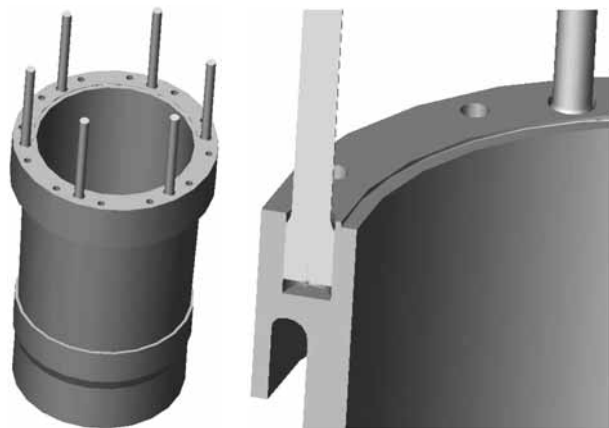


Рис. 1. Твердотельная модель втулки со шпильками

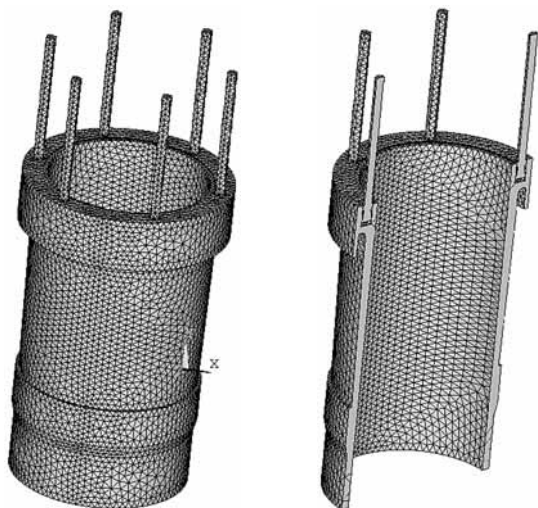


Рис. 2. Конечно-элементная модель втулки со шпильками

шпильки с деталью, в которую шпилька вворачивается, был проведен расчет в осесимметричной постановке со взаимодействием между витками резьбы через контактные элементы. Расчетная модель и распределение эквивалентных напряжений показана на рис. 3.

На основании полученных результатов на рис. 4 приведена зависимость распределения относительных напряжений  $\sigma_{\max}/\sigma$  от относительной координаты  $z/h$ , где  $h$  — общая длина резьбы шпильки;  $z$  — координата  $i$ -го витка резьбы.

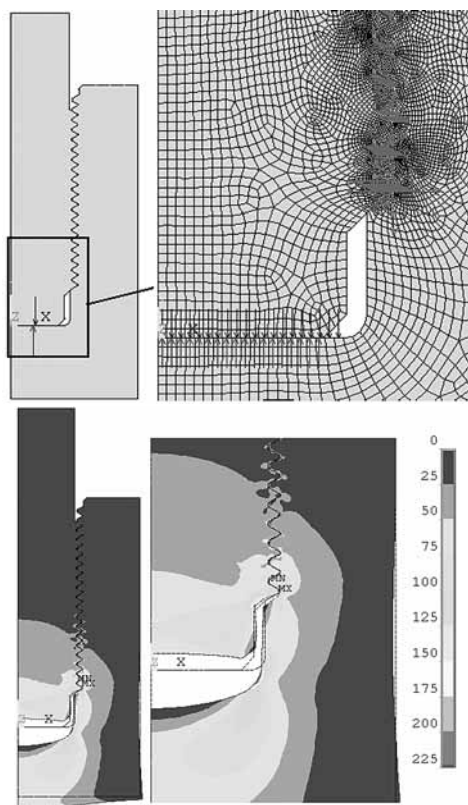


Рис. 3. Расчетная модель и эквивалентные напряжения от усилий вворачивания шпилек  $\sigma_{\text{эв}}$ , МПа

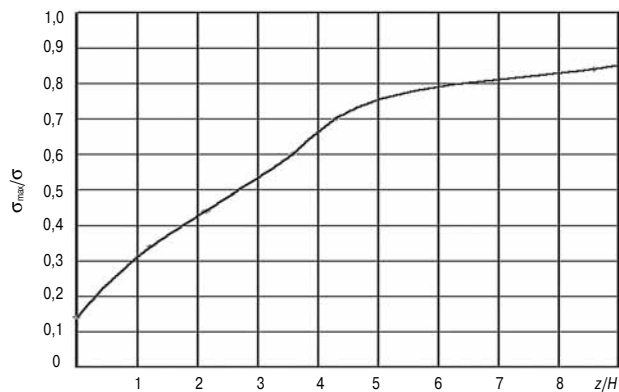


Рис. 4. Распределение относительных напряжений в резьбе шпильки

С учетом симметрии конструкции и условий нагружения в расчете используется часть втулки с прокладкой. Конечно-элементная модель части втулки, шпильки и прокладки с дополнительной разбивкой в зоне максимальных изменений напряжений (галтель в месте установки прокладки) представлена на рис. 5. Модель состоит из 76 800 квадратичных элементов и 129 088 узлов. Взаимодействие втулки и прокладки осуществляется через контактные элементы. Был проведен расчет от монтажных усилий при вворачивании шпилек с упором в дно резьбового отверстия моментом 10 кгМ (усилие около 30 000 Н). Усилие шпильки имитировалось давлением 120 МПа, приложенным к нижнему торцу стержня шпильки и к дну резьбового отверстия. На рис. 6 показаны эквивалентные напряжения от монтажных усилий.

Максимальные напряжения, не превышающие 220 МПа, носят локальный характер, имеют место в зоне нижнего витка резьбы и сопряжения дна резьбового отверстия и вертикальных стенок.

Распределение относительных напряжений от относительной координаты  $z/h$  по длине

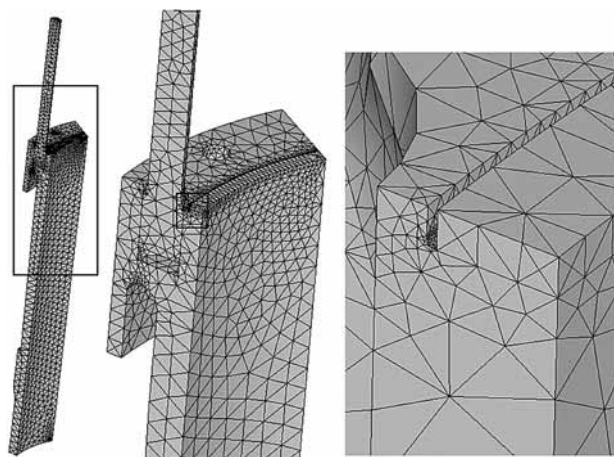


Рис. 5. Конечно-элементная модель 1/12 части втулки, шпильками и прокладки

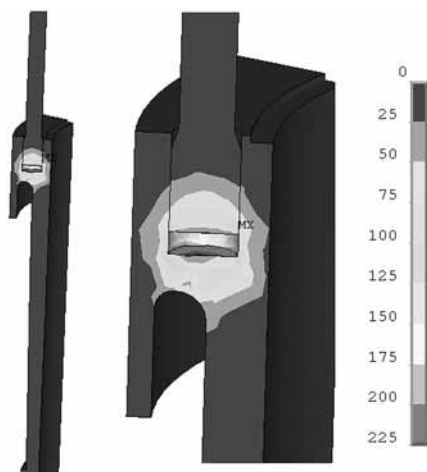


Рис. 6. Эквивалентные напряжения от усилий вворачивания шпилек  $\sigma_{\text{экв}}$ , МПа

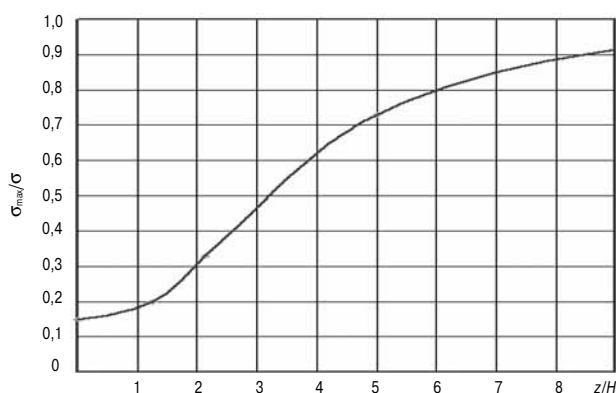


Рис. 7. Распределение относительных напряжений в резьбе шпильки

резьбовой части шпильки приведено на рис. 7.

Результаты расчетов, полученные на различных моделях показывают, что различия напряжений по виткам резьбового соединения, полученные методом «склеивания» составляет не более 11% в сравнении с результатами, полученными с применением контактных элементов (таблица,

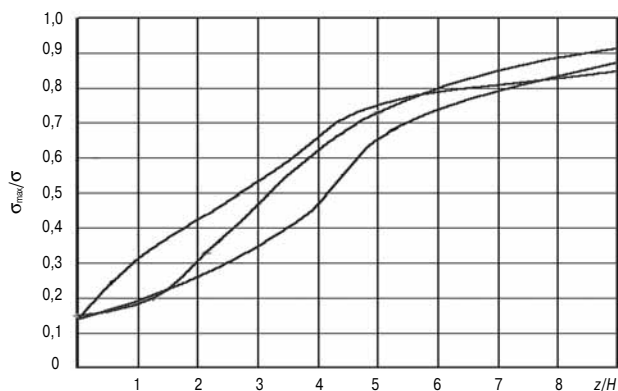


Рис. 8. Распределение относительных значений, определенных с помощью метода контактных элементов, метода «склеивания» и аналитического метода

$z/H$	Контактные элементы, $G_{\text{max}}/G$	«Склеивание», $G_{\text{max}}/G$	Различие относительных значений, определенных с помощью метода контактных элементов и метода «склеивания», %
0	0,14	0,14	0,00
1	0,31	0,18	41,94
2	0,42	0,31	26,19
3	0,53	0,47	11,32
4	0,66	0,62	6,06
5	0,75	0,73	2,67
6	0,79	0,8	1,27
7	0,81	0,85	4,94
8	0,83	0,89	7,23
9	0,85	0,91	7,06
Среднее значение, %			10,87

рис. 8). Достаточно близкие результаты приводятся в известной работе Биргера И. А. [1]. Следовательно, при моделировании резьбового соединения в трехмерной постановке можно использовать непосредственное соединение деталей.

В заключение следует отметить, что при моделировании напряженно-деформированного состояния корпусных деталей с применением объемных конечно-элементных моделей можно рекомендовать использование приема («склеивания») для описания работы резьбовых элементов.

#### Литература

- Биргер И.А., Шор Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. Справочник. — М : Машиностроение, 1993. — 639 с.
- Конкс Г.А., Лашко В.А. Мировое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта: учеб. пособ. — М. : Машиностроение, 2005. — 505 с.
- Зарубин В. С. Математическое моделирование в технике. — М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. — 496 с.
- Чайнов Н. Д., Раенко М. И., Рыжов В. А. Прочность теплонапряженных базовых деталей среднеоборотных двигателей внутреннего сгорания. — М. : Машиностроение, 2015. — 360 с.
- ГОСТ Р 52857.4–2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений.
- Чайнов Н.Д., Иващенко Н.А., Краснокутский А.Н., Мягков Л.Л. Конструирование двигателей внутреннего сгорания. — М : Машиностроение, — 2-е изд. — 2011. — 496 с.
- Петриченко Р. М. Элементы САПР ДВС. — Л. : Машиностроение, 1990. — 329 с.
- Никитин Е.А., Мерлис П.М., Салтыков М. А., Васильев Г.Л. Совершенствование основных узлов турбопоршневых двигателей. — М. : Машиностроение, 1974. — 207 с.
- Салтыков М.А., Горбунов М.Н., Гинзбург М.А., Кужелев В.П. Развитие методов и средств исследования прочности основных несущих деталей и узлов транспортных дизелей: сб. статей. — М. : Машиностроение, 1974.
- Орлин А.С., Круглов М.Г. и др.; под ред. Орлина А.С., Круглова М.Г. Двигатели внутреннего сгорания. Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей. — М. : Машиностроение, 1984. — 384 с.