

УДК621.431.75

РАСЧЁТ НА ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ДВС С ПОМОЩЬЮ ANSYS С УЧЁТОМ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

© 2015 В. В. Бирюк¹, А. А. Горшкалёв¹, С. С. Каюков¹, Е. А. Сайгаков²

¹ Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

² АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара

Представлена методика моделирования рабочих процессов двигателя внутреннего сгорания с использованием CAD/CAE – технологий. Рассмотрены вопросы моделирования газодинамических и тепловых процессов в четырёхтактных двигателях внутреннего сгорания с использованием программы ANSYS Fluent и ANSYS Steady-State Thermal, позволяющей получать поля распределений основных термодинамических параметров. Особое внимание уделяется созданию методики прочностного исследования, а также особенностям её настройки для решения задач, связанных с проектированием двигателей внутреннего сгорания.

Двигатель внутреннего сгорания, ANSYS, Fluent, CAD/CAE-технология, трёхмерная модель, сеточная модель, газодинамический расчёт, тепловой расчёт, прочностной расчёт

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-2-35-43

Целью работы является повышение точности определения нагрузок, действующих на детали кривошипно-шатунного механизма (КШМ) двигателя внутреннего сгорания (ДВС), за счёт учёта неравномерности газодинамических и тепловых параметров рабочего цикла. Для достижения поставленной цели были решены следующие основные задачи - проведена численная оценка влияния температуры и давления газов на элементы КШМ в программном комплексе *ANSYS Fluent* и *ANSYS Steady-State Thermal*, разработана методика прочностного исследования.

Решение задач достигалось с помощью МКЭ, компьютерного моделирования и платформы *ANSYS Workbench* с использованием модулей *ANSYS Fluent*, *ANSYS Steady-State Thermal* и *ANSYS Static Structural*.

Описанная методика предназначена для оптимизации проектных разработок на ранних стадиях, что, в свою очередь, снижает стоимость выпускаемой продукции, помогает проектным отделам сокращать цикл разработки нового изделия и сводить к минимуму количество натурных испытаний.

Новизна заключается в разработке методики проведения связанных расчётов с учётом неравномерности параметров рабочего цикла (газодинамики, теплообмена в цилиндре) и прочностного расчёта конструкции.

Данная работа содержит:

- методику расчёта газодинамики в камере сгорания;
- методику расчёта теплового состояния элементов КШМ;
- методику прочностного расчёта элементов КШМ.

Построение трёхмерной модели было выполнено в CAD программе SolidWorks. Построены 3-D модели поршня, пальца, шатуна, крышки шатуна, втулки и коленчатого вала. После этого была выполнена сборка элементов и подготовка её к расчёту (рис. 1), согласно схеме, изображённой на рис. 2.

Расчёт выполнялся в 3 этапа (рис. 3). На первом этапе в программном комплексе *ANSYS Fluent* был выполнен газодинамический расчёт КС, на втором этапе – расчёт теплового состояния поршня в программном комплексе *ANSYS Steady-State Thermal* для подтверждения его ра-

ботоспособности при работе в условиях повышенной температуры. Полученные значения температур и давления были переданы в *ANSYS Static Structural* в качестве граничных условий, где были получены эквивалентные напряжения и запасы прочности всех элементов КШМ.

Для расчёта газодинамических процессов в программе *ANSYS Fluent* была автоматически загружена созданная сеченная модель объёма камеры сгорания (КС) двигателя (рис. 4).



Рис. 1. Модель КШМ

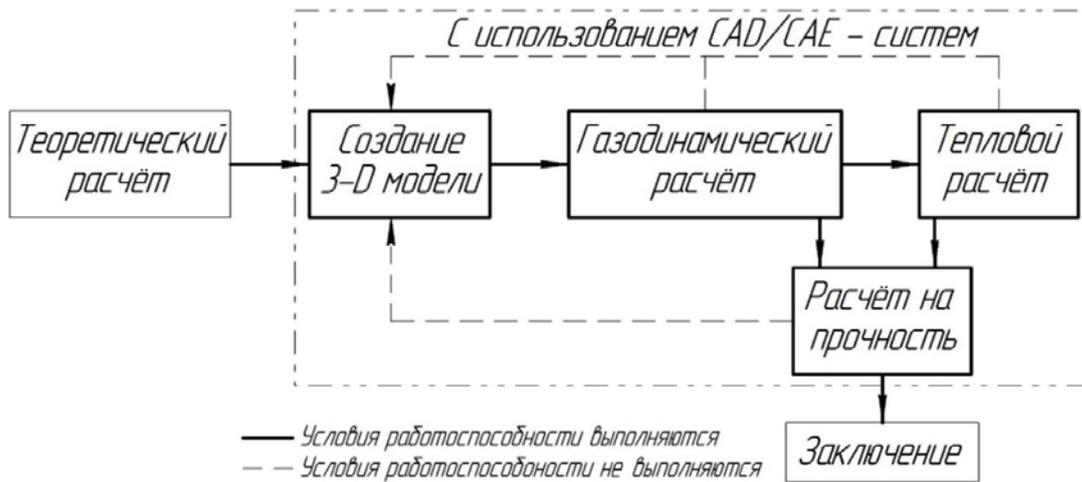


Рис. 2. Схема расчёта

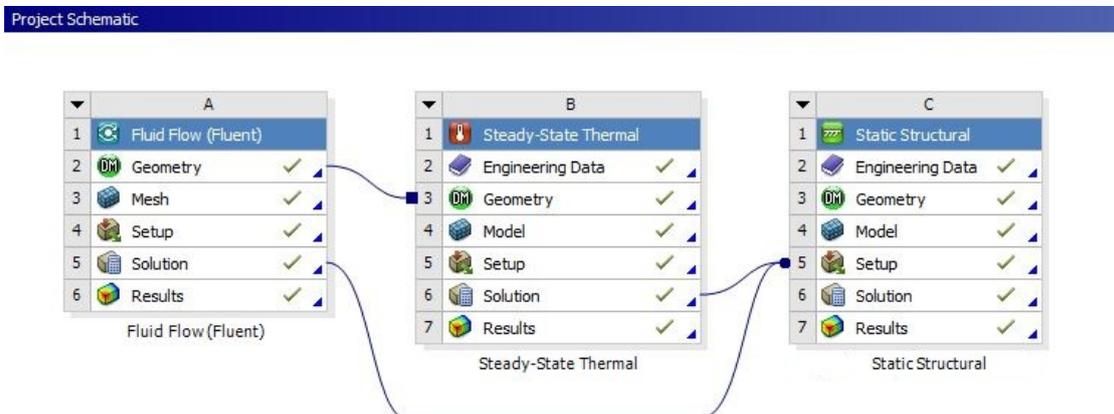


Рис. 3. Схема расчёта в ANSYS Workbench

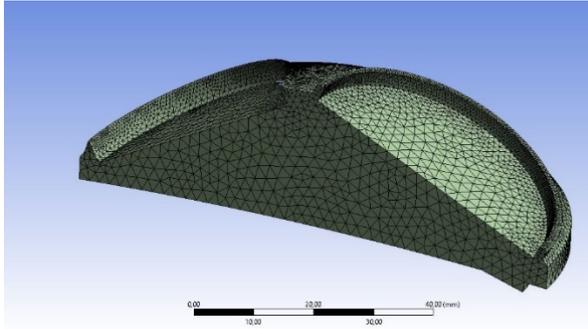


Рис. 4. Сеточная модель

Для газодинамического расчёта был выбран нестационарный метод моделирования с учётом турбулентных течений. Учитывая сложность задачи, использовалась $k-\varepsilon$ модель турбулентности. Для учёта теплообмена и теплопередачи к решению было подключено уравнение энергии. Для моделирования процесса горения была выбрана смесь *n-octane-air*.

В результате расчёта были получены поля распределения давления и температуры в камере сгорания, изображённые на рис. 5, 6.

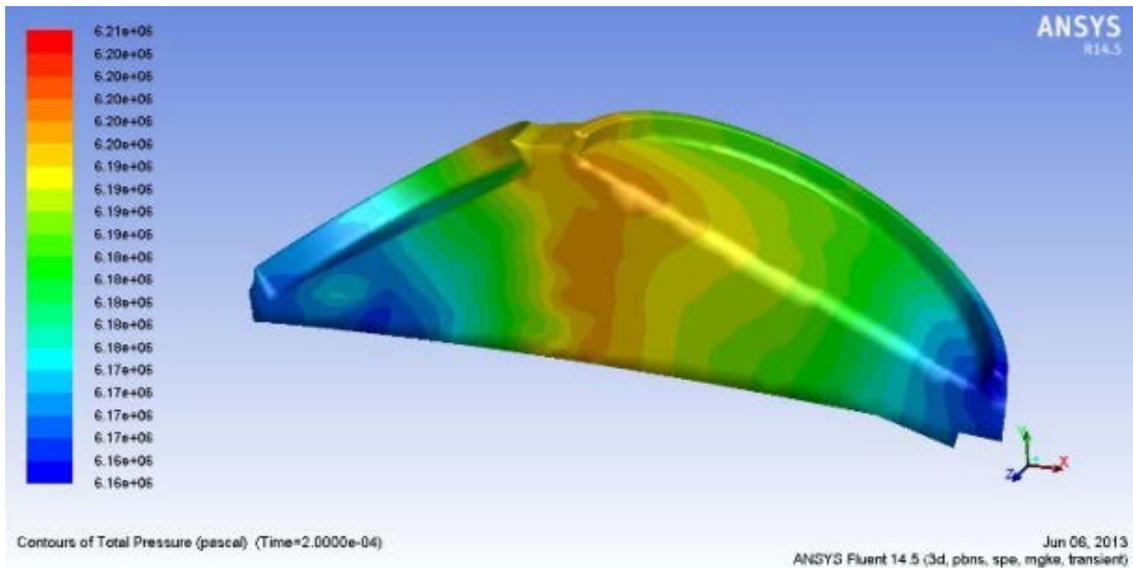


Рис. 5. Распределение давления в КС

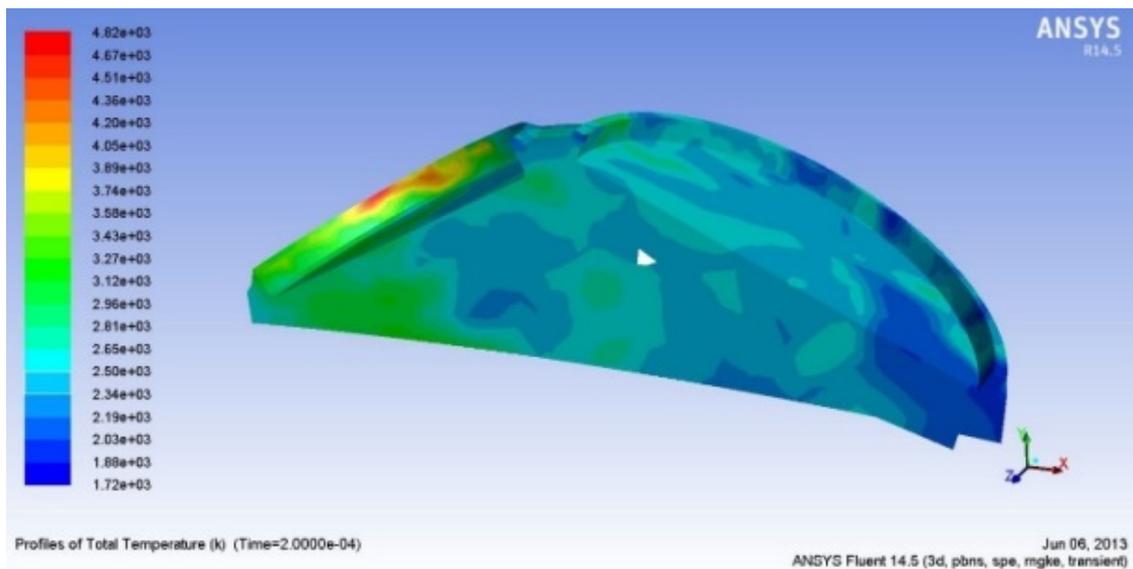


Рис. 6. Распределение температуры в КС

Максимальное давление в цилиндре достигает 6,21 МПа. Средние показатели по объёму камеры сгорания: давление сгорания – 6,18 МПа, температура в конце процесса горения – 2514 К. Результаты расчета газодинамики на этапе расчёта на прочность были экспортированы в *ANSYS Static Structural* в качестве граничного условия.

Поршень является важнейшей деталью двигателей внутреннего сгорания. При работе двигателя поршень испытывает высокие тепловые и механические нагрузки. Во время работы поршень непосредственно находится в соприкосновении с раскалёнными газами и интенсивно от них нагревается. Отвод же тепла от поршня затруднителен и происходит в стенки цилиндра через кольца и частично в масло, находящееся в картере.

Для решения задачи теплового анализа использовались поршень, палец, кольца и гильза. В качестве граничных условий приняты заданные коэффициенты теплоотдачи α и температура T (рис.7). Суммарный теплообмен между днищем поршня и газом характеризуется средним за цикл коэффициентом теплоотдачи α и результирующей температурой цикла. Данные параметры были определены в ходе расчёта с помощью программного комплекса *ANSYS Fluent* и являются граничными условиями на днище поршня, при расчёте в программе *ANSYS Steady-State Thermal*:

$$T_{cp} = 1063^{\circ}\text{C}, \alpha_{cp} = 650 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}.$$

Расчёт теплового состояния поршня на установившемся режиме работы двигателя заключается в определении его температурного поля. За критерий работоспособности поршня принимается температура в канавке первого поршневого кольца, которая не должна превышать 220°C ,

и температура днища, которая не должна быть более 350°C .

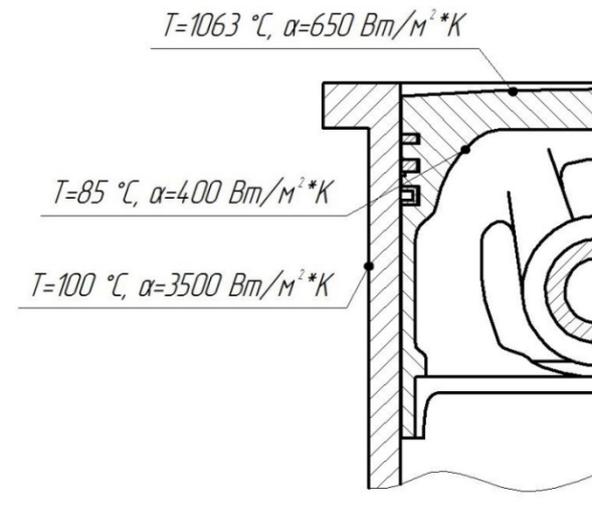


Рис. 7. Граничные условия

В результате расчёта было получено поле температур поршня, изображённое на рис. 8.

Максимальная температура поршня 296°C , температура в канавке первого поршневого кольца не превышает 200°C .

Эти данные стали граничными условиями в программе *ANSYS Static Structural*.

После выполнения газодинамического и теплового расчётов был использован следующий компонент расчётной схемы *ANSYS Static Structural* (рис. 3).

Каждому элементу КИМ был выбран материал с соответствующими характеристиками, настроены контакты между ними и наложена сетка (рис. 9).

Расчёт был выполнен для режима, при котором детали работают в наиболее тяжёлых условиях. Это режим максимального крутящего момента при частоте вращения 3200 об/мин , когда давление газов в цилиндре достигает наибольшего значения. Согласно газодинамическому расчёту в программе *ANSYS Fluent*, оно равно $6,2 \text{ МПа}$ при угле поворота коленчатого вала, равном 10° после ВМТ.

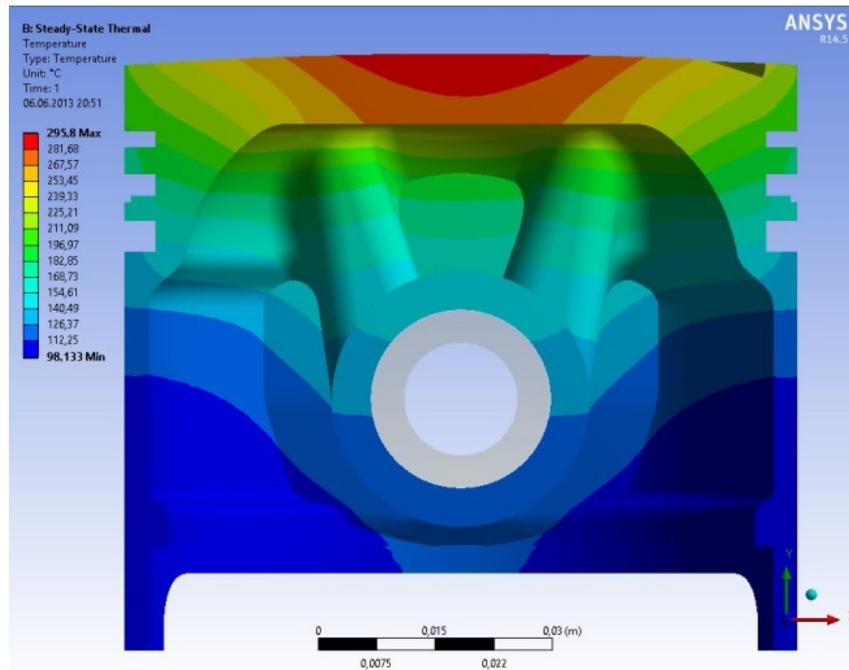


Рис. 8. Распределение температуры поршня

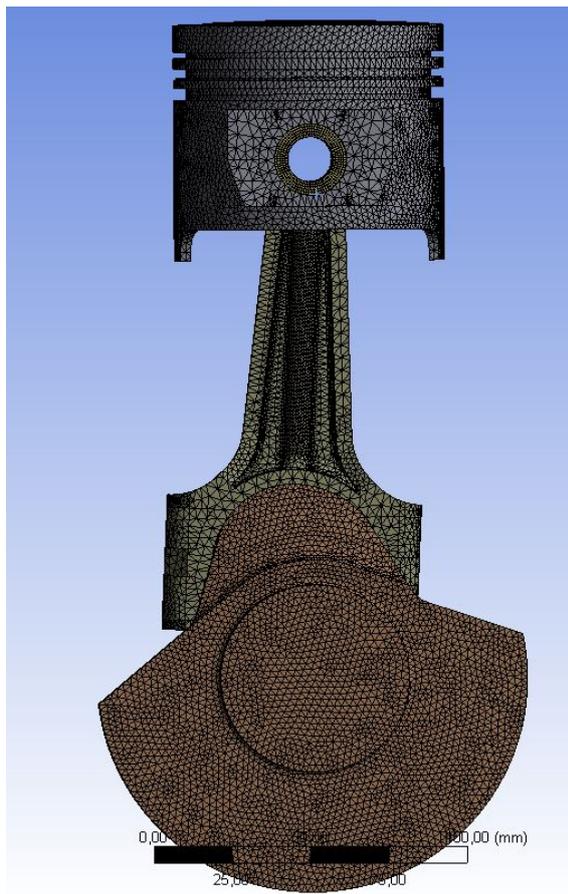


Рис. 9. Сеточная модель КШМ

Программный комплекс ANSYS Workbench позволяет передавать данные из одного расчёта в другой, что способствует более точной оценке конструкции, без осреднения параметров. Из газодинамического расчёта было передано в ANSYS Static Structural давление газов на днище поршня. При этом можно видеть направление векторов приложенной силы и её величину. На рис. 10 представлена визуализация распределения газовой силы P_r . Для расчёта неравномерно нагретый поршень ДВС, находящийся в упругом состоянии, нагружен температурой из ранее выполненного теплового расчёта в ANSYS Steady-State Thermal. Коренная шейка закреплена от перемещений и вращений по цилиндрической поверхности контакта с вкладышем. По завершении вычислений построены поля напряжений для всех элементов модели и их запас прочности (рис. 11, 12).

Анализ напряжений показывает, что уровень напряжений каждого элемента ниже пределов текучести соответствующих им материалов. Как видно из табл.1, все элементы удовлетворяют требованиям по запасу прочности. Запас прочности всей модели принимается по наименьшему значению всех элементов и равен 2,16.

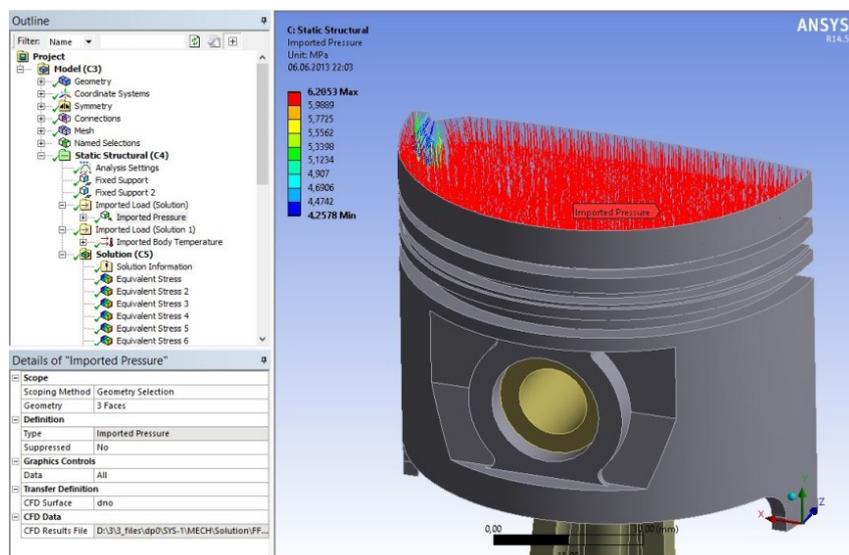


Рис. 10. Давление газов

Таблица 1. Результаты расчёта

Элемент	Напряжения, МПа	Запас прочности	Деформация, мм
Поршень	181	2,16	0,21
Палец	295/77,2	3,4 /3	0,16
Втулка	262	2,2	0,1
Шатун	337	2,9	0,1
Вкладыш	128	4,5	0,014
Коленвал	59	12,1	0,012

В результате выполнения данной работы были получены следующие результаты:

- 1) построена трёхмерная модель цилиндропоршневой группы ДВС;
- 2) разработана методика моделирования газодинамических процессов в камере сгорания в программе *ANSYS Fluent*;
- 3) разработана методика расчёта теплового состояния элементов КШМ в процессе работы двигателя в программе *ANSYS Steady – State Thermal*;
- 4) разработана методика расчёта на прочность кривошипно-шатунного механизма ДВС в программе *ANSYS Static Structural*.

Анализ проведённых расчётов показал, что средняя температура в камере сгорания в конце процесса горения достигает 2514 К, давление 6,18 МПа. Тепловой анализ показал, что температура поршня во время работы достигает 296 °С, температура в канавке первого поршневого кольца не превышает 200 °С. Критерии

работоспособности выполняются. Расчёт на прочность показал, что уровень напряжений каждого элемента ниже пределов текучести соответствующих им материалов. Запас прочности всей конструкции принимается по наименьшему значению всех элементов и равен 2,16.

Использование данной методики проведения расчётов позволяет получать более точные расчётные данные за счёт выполнения связанных задач, исключая осреднение переходных параметров. Это, в свою очередь, сокращает количество натурных испытаний, что приводит к сокращению времени и стоимости разработки и доводки двигателя.

Однако, приведённые модели являются удовлетворительными только для расчётов уровня первого приближения. Для повышения точности расчётов необходимо для граничных условий стенок и рабочего тела вносить больше статистических данных, полученных при различных исследованиях и испытаниях, а также при

построении конечно-элементных сеток закладывать зоны с блочными элементами для моделирования пограничного слоя, что в свою очередь обеспечит возможность применения моделей турбулентности высшего порядка.

Работы выполнены сотрудниками ЦКП САМ-технологий на оборудовании ЦКП в рамках соглашения RFMEFI59314X0003.

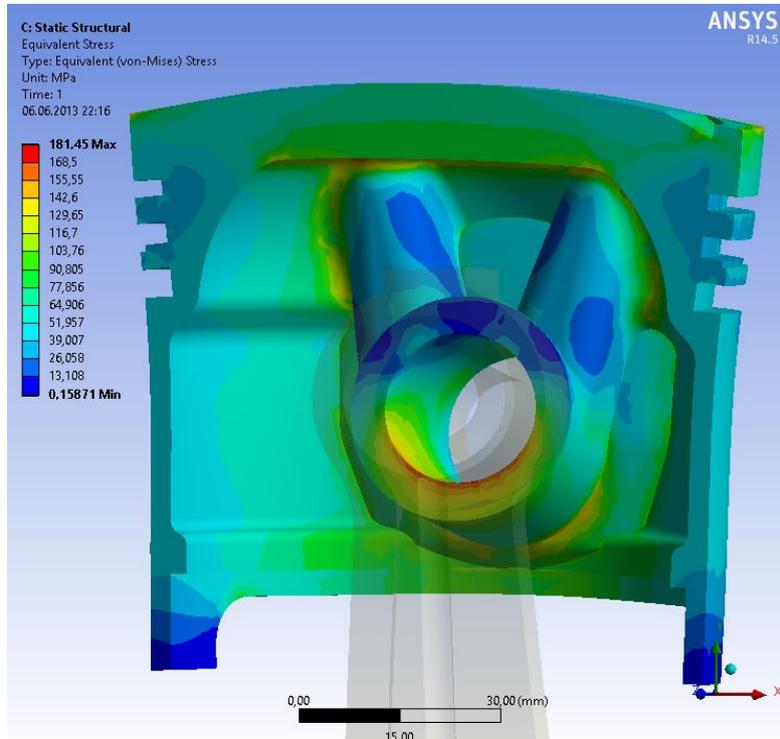


Рис. 11. Распределение напряжений в поршне

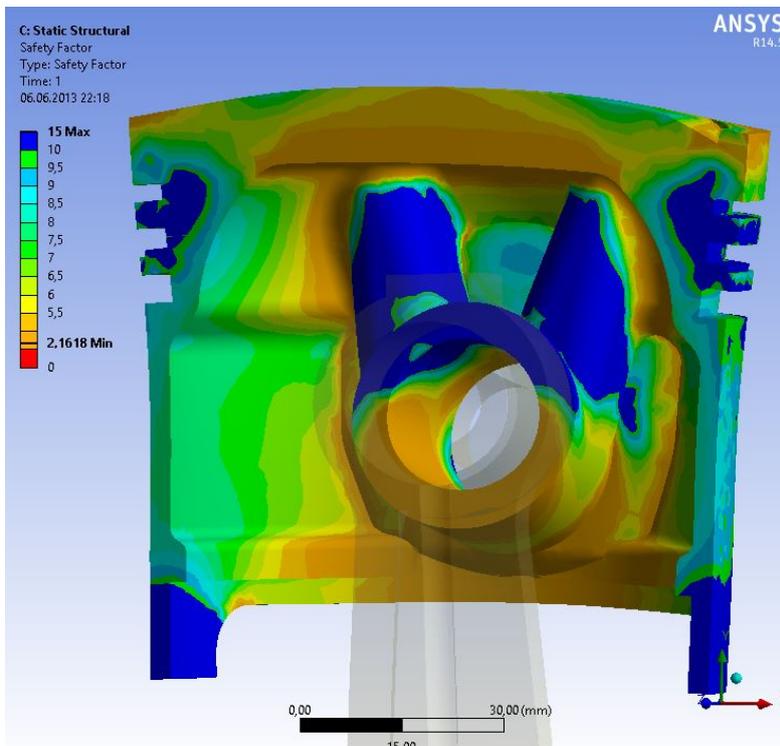


Рис. 12. Запас прочности поршня

Библиографический список

1. Гоц А.Н. Расчёты на прочность деталей ДВС при напряжениях, переменных во времени: учеб. пособие. Владимир: Владимирский гос. ун-т, 2005. 124 с.
2. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчёт на прочность деталей машин: учеб. пособие. Машиностроение, 1993. 640 с.
3. Бирюк В.В., Горшкалёв А.А., Сморгалов Д.В., Угланов Д.А. Моделирование тепловых и газодинамических процессов в двухтактном поршневом двигателе с помощью программы «FLUENT»: электрон. учеб. пособие. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2011. 73 с.
4. Бирюк В.В., Горшкалёв А.А., Каюков С.С., Угланов Д.А. Моделирование тепловых процессов в камере сгорания поршневого двигателя с непосредственным впрыском: уч. пособие. Самара: Самарский гос. аэрокосмический университет, 2012. 85 с.
5. Анисимов М.Ю., Бирюк В.В., Горшкалёв А.А., Каюков С.С., Угланов Д.А. Создание конечно-элементной сетки цилиндропоршневой группы ДВС. Самара: Самарский гос. аэрокосмический ун-т, 2013. 45 с.
6. Бирюк В.В., Горшкалёв А.А., Каюков С.С., Угланов Д.А. Моделирование газодинамических и тепловых процессов в цилиндропоршневой группе ДВС с использованием CFD-пакетов: электрон. учеб. пособие. Самара: Самарский гос. аэрокосмический ун-т, 2013. Электронные текстовые и граф. дан. (2,96 Мбайт).

Информация об авторах

Бирюк Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: teplotex_ssau@bk.ru. Область научных интересов: теплообмен в закрученных потоках жидкости и газа, энергоресурсосбережение.

Горшкалёв Алексей Александрович, инженер, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет).. E-mail: AGorsh@bk.ru. Область научных интере-

сов: моделирование рабочих процессов тепловых машин.

Каюков Сергей Сергеевич, инженер, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: street999@mail.ru. Область научных интересов: моделирование процессов тепловых машин.

Сайгаков Евгений Аркадьевич, инженер, АО «Ракетно-космический центр «Прогресс». E-mail: korvinc63@gmail.com. Область научных интересов: моделирование рабочих процессов тепловых машин.

STRENGTH ANALYSIS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE ELEMENTS BY USING ANSYS WITH TAKING INTO ACCOUNT HEAT PROCESSES IN THE COMBUSTION CHAMBER

© 2015 V. V. Biryuk¹, A. A. Gorshkalev¹, S. S. Kayukov¹, E. A. Saigakov²

¹Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

²Space Rocket Center “Progress”, Samara, Russian Federation

A procedure of modeling working processes of internal combustion engines (ICE) by using CAD/CAE software is presented. Issues of modeling gas- dynamic and heat process in 4-stroke internal combustion engines by using *ANSYS Fluent* and *ANSYS Steady-State Thermal* software which allows obtaining the fields of distribution of the principal thermodynamic parameters are discussed. Special attention is paid to developing a method of strength analysis and the peculiarities of adjusting it to solving of the tasks connected with internal combustion engine designing.

Internal combustion engine, ICE, ANSYS, Fluent, Steady-State Thermal, CAD/CAE software, 3-d model, mesh, computational fluid dynamics, heat calculations, strength analysis.

References

1. Goc A.N. *Raschety na prochnost' detaley DVS pri napryazheniyakh, peremennykh vo vremeni* [Strength analysis of engine parts for time-variant stresses]. Vladimir: Vladimir State University Publ., 2005. 124 p.
2. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. *Raschet na prochnost' detaley mashin* [Strength analysis of machine elements: study guide]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1993. 640 p.
3. Biryuk V.V., Gorshkalev A.A., Smorkalov D.V., Uglanov D.A. *Modelirovanie teplovykh i gazodinamicheskikh protsessov v dvukhtaktnom porshnevom dvigatele s pomoshch'yu programmy «FLUENT»* [Modeling thermal and gas-dynamic processes in a two-stroke piston engine with the help of the "FLUENT" program]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2011. 73 p.
4. Biryuk V.V., Gorshkalev A.A., Kaukov S.S., Uglanov D.A. *Modelirovanie teplovykh protsessov v kamere sgoraniya porshneвого dvigatelya s neposredstvennym vpryskom* [Modeling thermal processes in the combustion chamber of a direct fuel injection reciprocating engine]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2012. 85 p.
5. Anisimov M.Yu., Biryuk V.V., Gorshkalev A.A., Kaukov S.S., Uglanov D.A. *Sozdanie konechno-elementnoy setki tsilindroporshnevoy gruppy DVS* [Creating of a finite element mesh of the cylinder-piston group of internal combustion engines]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2013. 45 p.
6. Biryuk V.V., Gorshkalev A.A., Kaukov S.S., Uglanov D.A. *Modelirovanie gazodinamicheskikh i teplovykh protsessov v tsilindroporshnevoy gruppe DVS s ispol'zovaniem CFD-paketov* [Modeling of gas dynamic and thermal processes in the cylinder-piston group of internal combustion engines using CFD-packages: jelektron. ucheb. posobie]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2013.

About the authors

Biryuk Vladimir Vasilevich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: tep-lotex_ssau@bk.ru. Area of Research: vortex effect and its application in engineering, heat and mass exchange, thermodynamics.

Kayukov Sergey Sergeevich, Engineer, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail:

street999@mail.ru. Area of Research: work processes of heat engines.

Gorshkalev Alexey Aleksandrovich, Engineer, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: AGorsh@bk.ru. Area of Research: work processes of heat engines.

Saigakov Evgeniy Arkadevich, Engineer, Space Rocket Center "Progress", Samara, Russian Federation. E-mail: korvinc63@gmail.com. Area of Research: work processes of heat engines.