

Методика расчета напряженно-деформированного состояния деталей двигателя внутреннего сгорания в системе SolidWorks

Н. И. Петров, Т. Л. Антонова, М. Э. Суняева

Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева

Аннотация: Проведено исследование напряженно-деформированного состояния поршня двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и его составляющих с использованием метода контактного взаимодействия, с цилиндро-поршневой группой. Для проведения исследования использовался двигатель судовой четырехцилиндровой четырехтактной непереворачиваемой тронковой без наддува с реверсивно-редукторной передачей, диаметром цилиндра 85 мм и ходом поршня 110 мм, 4ЧСП8,5/11. Выведен алгоритм, учитывающий деформации контактирующих деталей. Разработана методика для расчета напряженно-деформированного состояния поршня с маслосъемными и компрессионными кольцами. Данный метод заключается в решении систем дифференциальных уравнений, которые представлены взаимосвязью различных параметров твердого деформируемого тела.

Ключевые слова: деформация, контактные напряжения, конструктивные параметры.

Для цитирования: Петров Н. И., Антонова Т. Л., Суняева М. Э. Методика расчета напряженно – деформированного состояния деталей двигателя внутреннего сгорания в системе SolidWorks // Вестник СибГУТИ. 2024. Т. 18, № 4. С. 22–31. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2024-18-4-22-31>.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution
4.0 License

© Петров Н. И., Антонова Т. Л.,
Суняева М. Э., 2024

Статья поступила в редакцию 26.01.2024;
переработанный вариант – 07.04.2024;
принята к публикации 12.05.2024.

1. Введение

Расчет прочностных характеристик предполагает высокую точность определения всех составляющих напряженно-деформированного состояния. Оценим эффективность метода конечных элементов, при создании конструкции отражающей ее геометрические характеристики и формированием конечно-элементной сетки, учитывающей граничные условия, с возможностью закладки геометрической или физической нелинейности [1-4]. Напряженно-деформированное состояние в САД-системах (англ. Computer-aided design, САД) – это автоматизированная система, реализующая информационную технологию выполнения функций проектирования, отличается интерпретацией конечных элементов, взаимодействующих в узловых точках, для каждому из которых соответствует матрица функции формы N , для интерполяции решения по выбранной форме расчетного элемента на основе значений в узловых точках:

$$\{u\}^{[e]} = N^{[e]} \cdot \{u\}. \quad (1)$$

2. Основная часть

Определим для рассчитываемой детали ДВС деформацию узловых точек следующим образом:

$$\{\varepsilon\}^{(e)} = A^T \cdot \{u\}^{(e)}. \quad (2)$$

Тогда полную энергию определим из выражения:

$$T^{(e)} = \frac{1}{2} \cdot \{u\}^T \cdot \iiint_{V^{(e)}} \left[(A^T \cdot N^{(e)})^T \cdot C_e \cdot (A^T \cdot N^{(e)}) \right] dV \cdot \{u\} - \{u\} \cdot \iint_{S^{(e)}} [\{P\}^{(e)T} \cdot N^{(e)}] dS - \{u\} \cdot \iiint_{V^{(e)}} [\{F\}^{(e)T} \cdot N^{(e)}] dV \quad (3)$$

После проведения замены:

$$K^{(e)} = \iiint_{V^{(e)}} \left[(A^{(e)T} \cdot N^{(e)})^T \cdot C_e \cdot (A^T \cdot N^{(e)}) \right] dV, \quad (4)$$

$$\{Q_P^{(e)}\} = \iint_{S^{(e)}} [\{P\}^{(e)T} \cdot N^{(e)}] dS, \quad (5)$$

$$\{Q_F^{(e)}\} = \iiint_{V^{(e)}} [\{F\}^{(e)T} \cdot N^{(e)}] dS, \quad (6)$$

где $K^{(e)}$ – матрица жесткости рассчитываемой детали; $\{Q_P^{(e)}\}$ – узловые силы элемента, статически равный поверхностным силам; $\{Q_F^{(e)}\}$ – вектор, эквивалентный объемным силам.

При минимизации полной энергии получим уравнение:

$$\frac{\partial}{\partial \{u\}} \sum_{i=1}^n T^{(e)} = 0, \quad (7)$$

Основу метода представим в виде:

$$\{u\} \cdot \sum_{i=1}^n K_i^{(e)} = \sum_{i=1}^n \left(\{Q_P^{(e)}\}_i + \{Q_F^{(e)}\}_i \right) \quad (8)$$

Заменяем составляющие выражения:

$$K = \sum_{i=1}^n K_i^{(e)}; \quad \{Q\} = \sum_{i=1}^n \left(\{Q_P^{(e)}\}_i + \{Q_F^{(e)}\}_i \right), \quad (9)$$

где K – матрица коэффициентов; $\{Q\}$ – вектор узловых сил.

Следовательно, итоговое уравнение представим следующим образом:

$$K \cdot \{u\} = \{Q\} \quad (10)$$

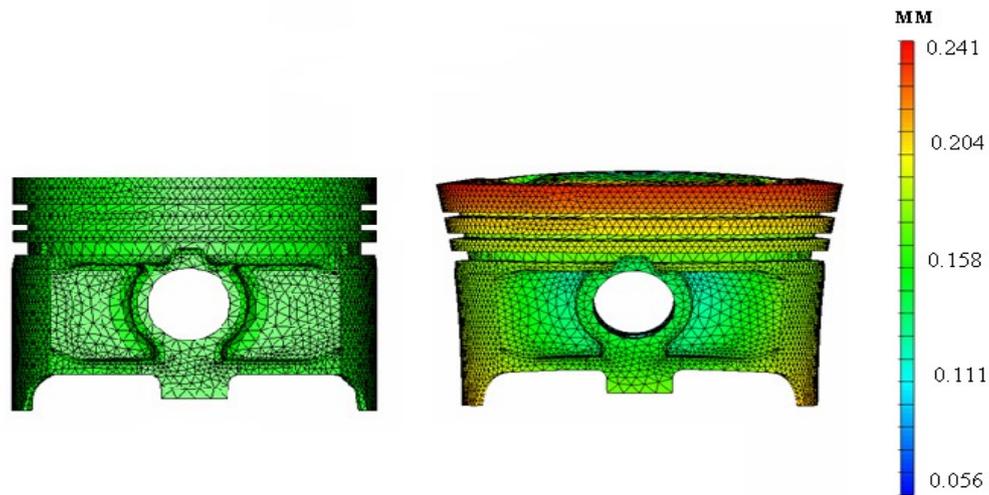
Напряжения, деформации, перемещение будут иметь вид:

$$\{u\}^{(e)} = N^{(e)} \cdot \{u\} \quad (11)$$

$$\{\varepsilon\}^{(e)} = A^T \cdot \{u\}^{(e)} \quad (12)$$

$$\{\sigma\}^{(e)} = C_e \cdot \{\varepsilon\}^{(e)} \quad (13)$$

Рассмотрим методику в форме исследования напряженно-деформированного состояния деталей судового двигателя внутреннего сгорания и понаблюдаем за геометрией поршня взаимодействия деталей цилиндропоршневой группы при их совместном деформировании. При подготовке данных твердотельного моделирования созданы трехмерные модели исследуемого объекта [5-8]. Затем определяем оптимальные параметры ячеек конечно-элементной сетки, начальные и граничные условия. Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния в CAD-системе представлены на рис. 1-4.



а) б)
Рис. 1. Поршень ДВС, где а) исходный вид, б) деформированный

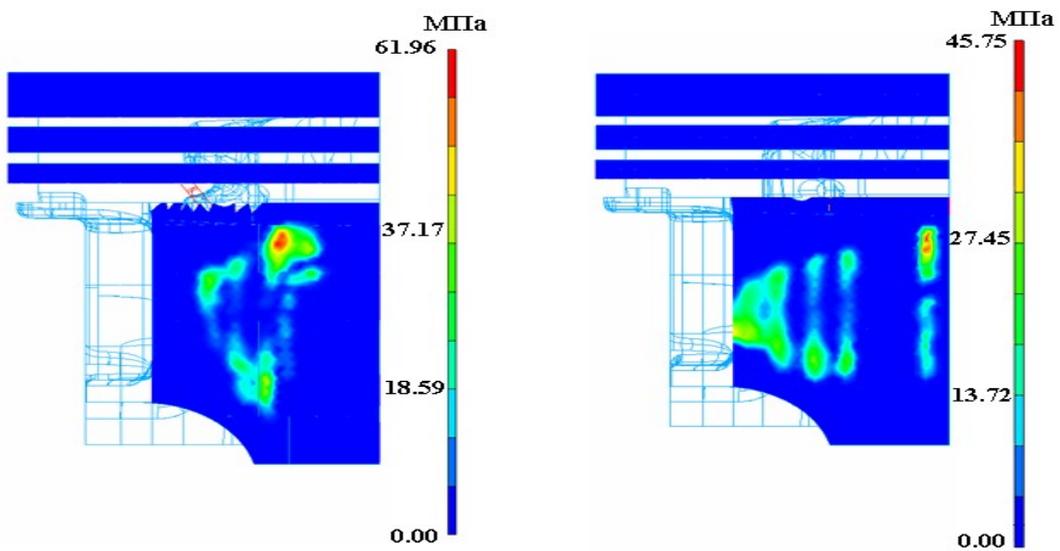


Рис. 2. Распределение контактных напряжений по поверхности поршня ДВС

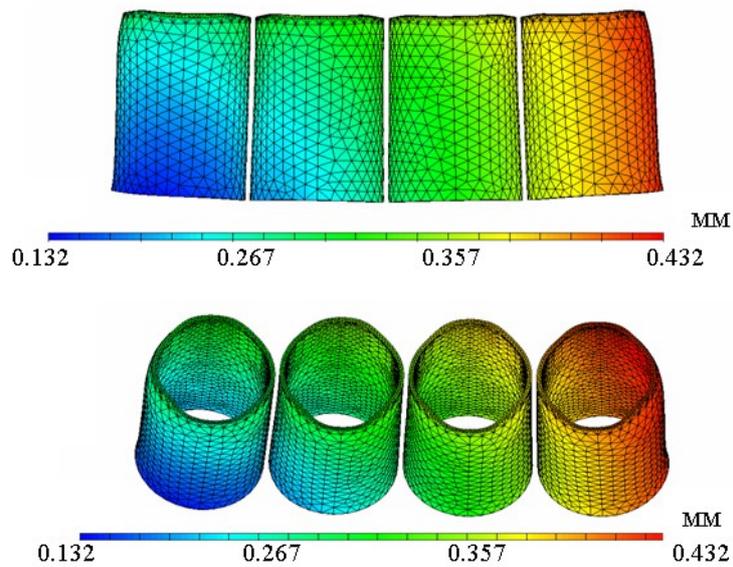


Рис. 3. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния гильз цилиндров

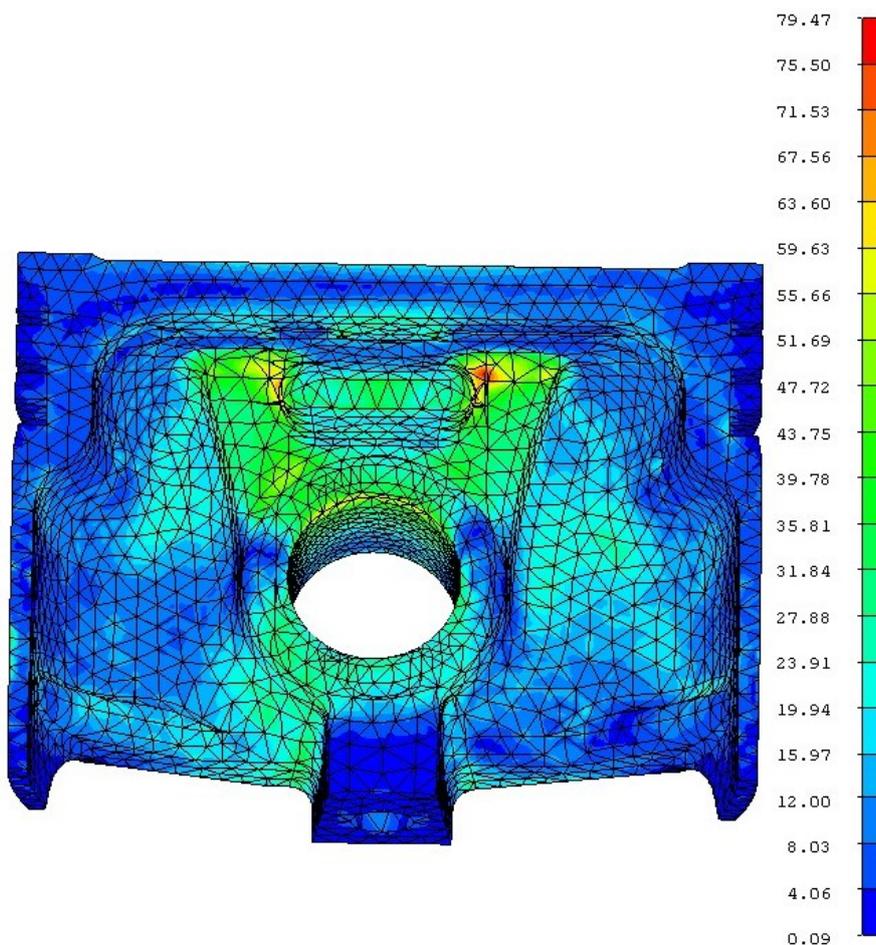


Рис. 4. Расчет напряженно-деформированного состояния базового поршня ДВС

Численное моделирование процесса ползучести показало удовлетворительно согласование с экспериментальными данными, что наглядно продемонстрировано на рис. 5, где сплошными линиями указаны экспериментальные зависимости деформации, а штриховыми – расчетные зависимости.

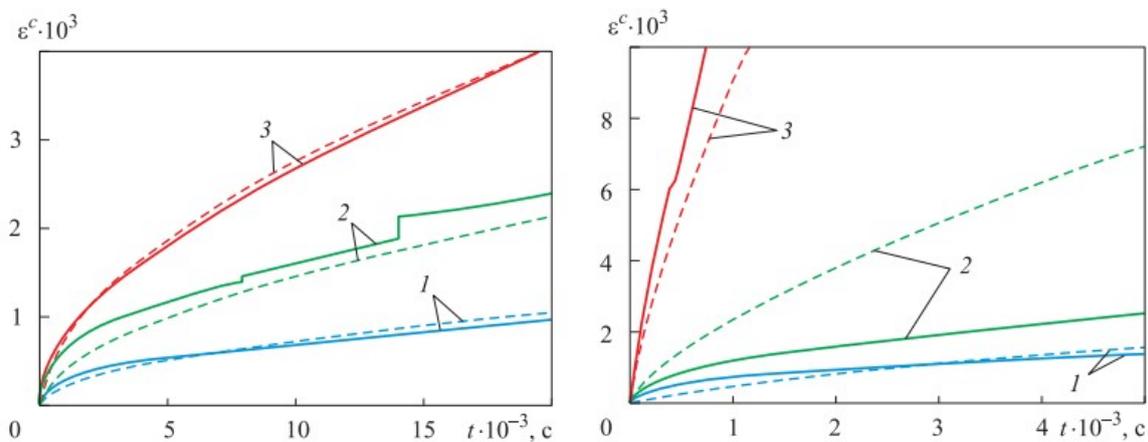


Рис. 5. Зависимость деформации ползучести ϵ_c от времени t

Уравнение для полной деформации имеет вид:

$$\epsilon = \epsilon^l + \epsilon^e + \epsilon^p + \epsilon^c$$

Условие текучести можно вычислить как

$$f(\sigma_{ij}) = \frac{3}{2}(s_{ij} - a_{ij})(s_{ij} - a_{ij}) - [\sigma_T(T)]^2 = 0,$$

для скорости упругой деформации

$$\dot{\epsilon}_{ij}^e = \frac{1}{E_{ij}} [\dot{\sigma}_{ij} - \nu(3\dot{\sigma}_0\delta_{ij} - \dot{\sigma}_{ij})],$$

закон нелинейного кинематического упрочнения

$$\dot{a}_{ij} = \frac{2}{3} C \dot{\epsilon}_{ij}^p - \gamma a_{ij} \dot{\epsilon}_{u*}^p,$$

ассоциированный закон течения

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{3}{2} \frac{s_{ij} - a_{ij}}{\sigma_u^*} \dot{\epsilon}_{u*}^p,$$

для скорости деформации ползучести

$$\dot{\epsilon}_u^c = C_1 \sigma^{C_2} (\epsilon_u^c)^{C_3} e^{-C_4/T},$$

где ϵ^e – упругая деформация; T – начальная температура; ν – коэффициент Пуассона; $\sigma_0 = \sigma_{ij} / 3$ – среднее напряжение; δ_{ij} – символ Кронекера; σ_u^* – интенсивность активных напряжений.

Исследование напряженно-деформированного состояния моноблока судового дизеля наглядно демонстрирует рис. 6.

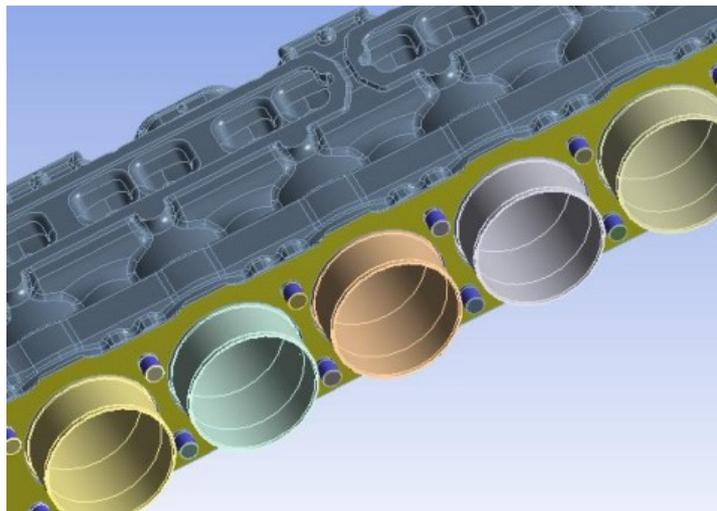


Рис. 6. Кинематические граничные условия

Деформированное состояние гильзы второго цилиндра представлено на рис. 7. Овалы гильзы приведены в Таблице 1.

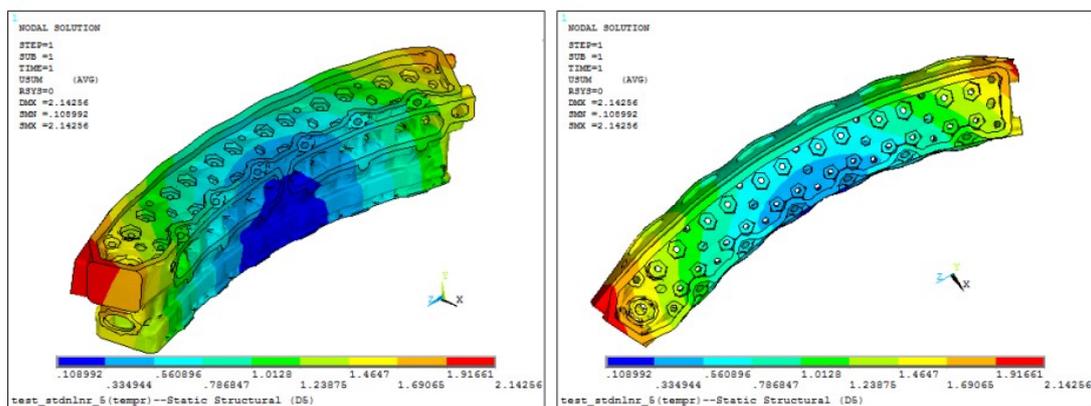


Рис. 7. Деформация головки блока цилиндров и прокладки

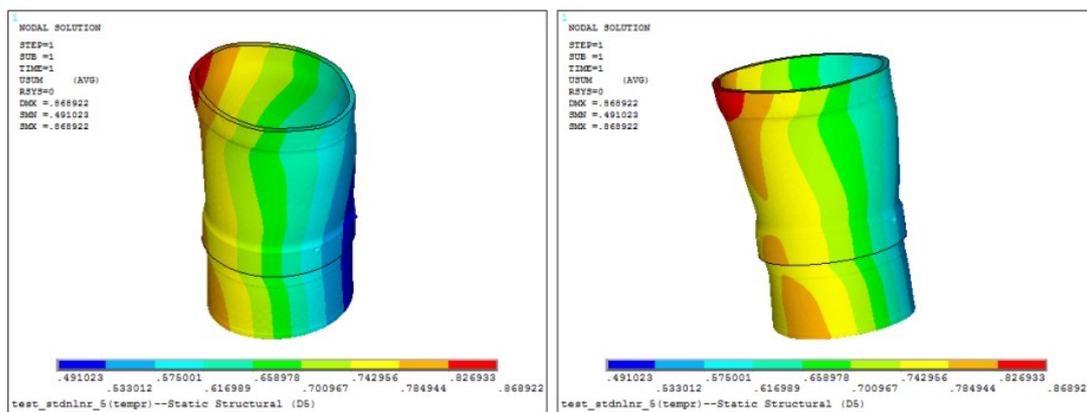


Рис. 8. Деформация гильзы второго цилиндра

Таблица 1. Перемещение узлов и овалы 2-й гильзы

Пояс	Перемещения		Овалы, мм
	По оси X, мм	По оси Z, мм	
Верхний посадочный	0,314	0,096	0,216
Средний посадочный	0,214	0,146	0,066
Нижний посадочный	0,115	-0,215	0,327

Из таблицы видно, что овалы гильзы достигают значительной величины, в связи с этим были исследованы альтернативные варианты конструкции: отдельно выполненные блок цилиндров и головка блока, а также моноблок, выполненный из высокопрочного чугуна [9–11]. Перемещения чугунного моноблока и гильзы представлены на рис. 9. Перемещения и овалы гильзы представлены в таблице 2. Таким образом наглядно продемонстрировано значительное уменьшение овалов гильз наряду с изгибающими перемещениями моноблока, что благоприятно влияет на эксплуатационные характеристики поршневых колец и снижает вероятность выхода газа из подпоршневого пространства, если его причиной является недостаточное уплотнение.

Таблица 2. Перемещение узлов и овалы 2-й гильзы

Пояс	Перемещения		Овалы, мм
	По оси X, мм	По оси Z, мм	
Верхний посадочный	0,146	0,115	0,032
Средний посадочный	0,176	0,098	0,079
Нижний посадочный	0,118	0,236	0,120

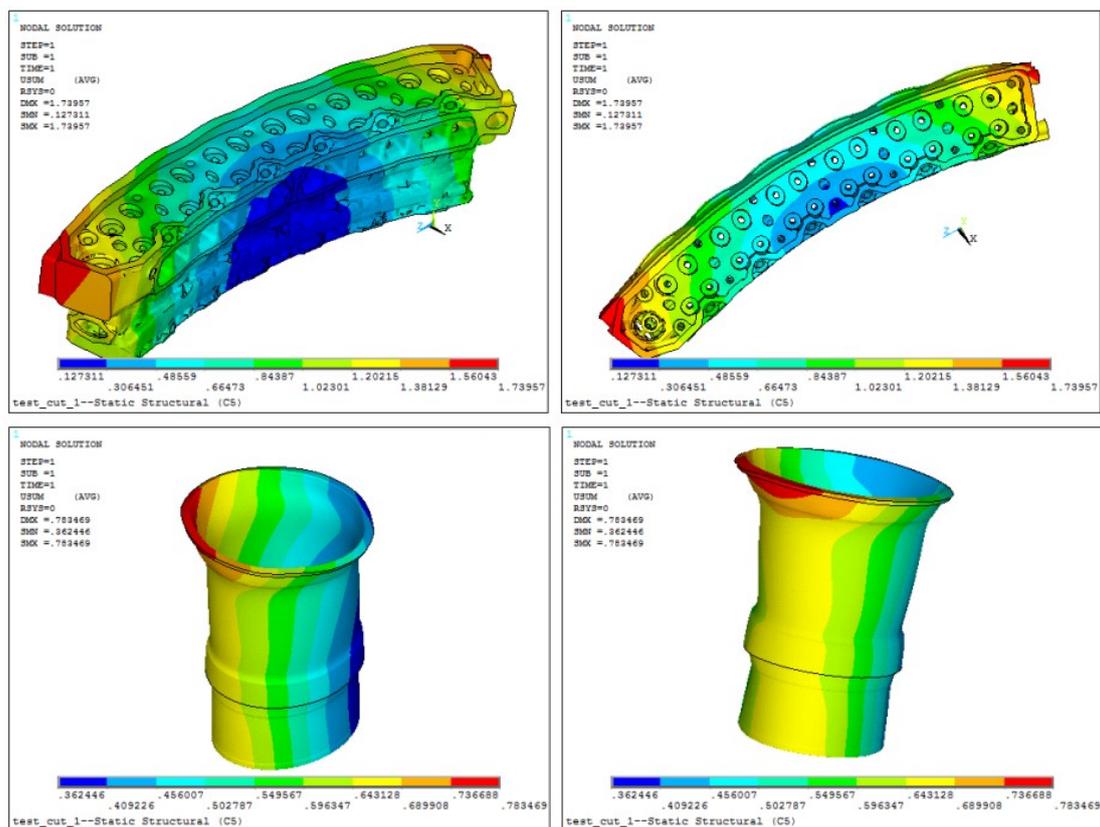


Рис. 9. Перемещения чугуного моноблока и гильзы

3. Вывод

Настоящее исследование наглядно демонстрирует, что любые технические задачи в подборе наиболее оптимальных конструктивных параметров деталей и узлов судового оборудования и обеспечению эксплуатационной надежности решаемы благодаря геометрическому моделированию в CAD системах. Разработанные методики расчета напряженно-деформированного состояния деталей двигателей внутреннего сгорания имеют практическую значимость в проектировании и конструировании двигателей внутреннего сгорания для предприятий судостроения.

Литература

1. Сивцев П. В. Численное исследование некоторых прикладных проблем расчета напряженно-деформированного состояния: Дис...к.-та физ.-мат. наук: 05.13.18. – Якутск, 2018. – 148 с.
2. Bisong M. S., Sivtsev P. V., Lepov V. V. Numerical Analysis of Stress-Strain State and Crack Propagation in Welded Samples // Solid State Phenomena / Trans Tech Publ. — Vol. 265. — 2017. — P. 507–512.
3. Gaspar F., Grigoriev A., Vabishchevich P. Explicit-implicit splitting schemes for some systems of evolutionary equations // International Journal of Numerical Analysis & Modeling. — 2014. — Vol. 11, no. 2. — P. 346–357.
4. Han W., Reddy B. D. Plasticity: mathematical theory and numerical analysis. – Springer Science & Business Media, 2012. — Vol. 9.
5. Муратов М. В. Сеточно-характеристический метод на неструктурированных тетраэдральных сетках / М.В. Муратов, И.Б. Петров, А.В. Санников, А.В. Фаворская // Журнал вычислительной техники и математической физики. № 5 (Т. 54). – М., 2014. – С.821-832.

6. *Пищев О. А.* Методика расчета термо-напряженного состояния корпусных деталей и поршней внутреннего сгорания: Дис...к.-та техн. наук: 01.02.06, 05.04.02 – Н.-Новгород, 2006. – 115 с.
7. *Ведерникова Е. Л.* Структура грузоподъемного крана как технической системы для имитационного моделирования//Подъемно-транспортное дело/ Москва, 2016, №6 – С.8-10
8. *Чан Б. Х.* Разработка и исследование процесса винтовой прокатки в четырехвалковом стане на основе физического и компьютерного моделирования: Дис...к.-та техн. наук: 05.16.05. – Москва, 2018. – 102 с.
9. *Чайнов Н. Д.* Расчет теплового и напряженно-деформированного состояния моноблока быстроходного судового дизеля / Н.Д. Чайнов, Н.С. Иванова, Н.Г. Мелещенко // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, М., 2017. – С. 34-42
10. *Мягков Л. Л.* Моделирование напряженно-деформированного состояния поршня дизеля с учетом неупругих деформаций / Л.Л. Мягков, С.М.Сивачев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, М., 2020. – С. 29-36
11. *Manson S. S., Halford G. R.* Fatigue and Durability of Metals at High Temperatures. Materials Park, Ohio, ASM International, 2009. 278 p.

Петров Николай Иванович

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, +7 (903) 660-60-07, petrov.n.i@muctr.ru, ORCID ID: 0000-0002-5360-0806

Антонова Тамара Леонидовна

кандидат химических наук, доцент кафедры физической химии, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, +7 (916) 654-89-26, antonova.t.l@muctr.ru, ORCID ID: 0009-0003-4666-6983

Суняева Муршида Энверовна

ассистент кафедры физики, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, +7 (499) 978-59-30, mursidasunaeva@gmail.com, ORCID ID: 0009-0004-3471-069X

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад соавторов: каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.

Methodology for calculating the stress-strain state of internal combustion engine parts in the SolidWorks system

N. I. Petrov, T. L. Antonova, M. E. Sunyaeva

D. I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology

Abstract: The stress-strain state of the piston of an internal combustion engine (ICE) and its components is studied using the method of contact interaction with a cylinder-piston group. To conduct the study, a marine four-cylinder four-stroke non-reversible cylinder engine without supercharging with a reversible gear transmission, a cylinder diameter of 85 mm and a piston stroke of 110 mm, 4HSP8.5/11 was used. An algorithm is derived that takes into account the deformations of the contacting parts. A technique has been developed for calculating the stress-

strain state of a piston with oil-removing and compression rings. This method consists in solving systems of differential equations, which are represented by the relationship of various parameters of a solid deformable body.

Keywords: deformation, contact stresses, design parameters.

For citation: Petrov N. I., Antonova T. L., Sunyaeva M. E. Methodology for Calculating the stress-strain state of internal combustion engine parts in the SolidWorks system // Bulletin of SibGUTI. 2024. Vol. 18, No. 4. pp. 22-31. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2024-18-4-22-31>.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Petrov N. I., Antonova T. L.,
Sunyaeva M. E., 2024

The article was submitted: 26.01.2024;
revised version: 07.04.2024;
accepted for publication 12.05.2024.

References

1. Sivcev P. V. *Chislennoe issledovanie nekotory`x prikladny`x problem rascheta napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya* [Numerical investigation of some applied problems of stress-strain state calculation]: Dis...k.-ta fiz.-mat. nauk: 05.13.18. – Yakutsk, 2018. – 148 p.
2. Bisong M. S., Sivtsev P. V., Lepov V. V. Numerical Analysis of Stress-Strain State and Crack Propagation in Welded Samples. *Solid State Phenomena. Trans Tech Publ.* — Vol. 265. — 2017. — P. 507–512.
3. Gaspar F., Grigoriev A., Vabishchevich P. Explicit-implicit splitting schemes for some systems of evolutionary equations. *International Journal of Numerical Analysis & Modeling.* — 2014. — Vol. 11, no. 2. — P. 346–357.
4. Han W., Reddy B. D. *Plasticity: mathematical theory and numerical analysis.* – Springer Science & Business Media, 2012. — Vol. 9.
5. Muratov M. V. *Setochno-kharakteristicheskij metod na nestruturirovannykh tetraedral'nykh setkax* [Grid-characteristic method on unstructured tetrahedral grids]. *Zhurnal vychislitelnoj tekhniki i matematicheskoy fiziki.* № 5 (T. 54). – M., 2014. – P.821-832.
6. Pishhaev O. A. *Metodika rascheta termonapryazhennogo sostoyaniya korpusny`x detalej i porshnej vnutrennego sgoraniya* [The method of calculating the thermally stressed state of body parts and internal combustion pistons]: Dis...k.-ta texn. nauk: 01.02.06, 05.04.02 – N.-Novgorod, 2006. – 115 p.
7. Vedernikova E. L. *Struktura gruzopod`emnogo krana kak texnicheskoy sistemy` dlya imitacionnogo modelirovaniya* [The structure of a lifting crane as a technical system for simulation] *Pod`emno-transportnoe delo.* Moskva, 2016, №6 – P.8-10
8. Chan B. X. *Razrabotka i issledovanie processa vintovoj prokatki v chety`rexvalkovom stane na osnove fizicheskogo i komp`yuternogo modelirovaniya* [Development and research of the screw rolling process in a four-roll mill based on physical and computer modeling]: Dis...k.-ta texn. nauk: 05.16.05. – Moskva, 2018. – 102 p.
9. Chajnov N. D. *Raschet teplovogo i napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya monobloka by`strodnogo sudovogo dizelya* [Calculation of the thermal and stress-strain state of a monoblock of a high-speed marine diesel engine] *Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Mashinostroenie, M.,* 2017. – P. 34-42
10. Myagkov L. L. *Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya porshnya dizelya s uchetom neuprugix deformacij* [Modeling of the stress-strain state of a diesel piston taking into account inelastic deformations] *Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Mashinostroenie, M.,* 2020. – P. 29-36
11. Manson S. S., Halford G. R. *Fatigue and Durability of Metals at High Temperatures.* Materials Park, Ohio, ASM International, 2009. 278 p.

Petrov Nikolay Ivanovich

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics, D. I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, +7 (903) 660-60-07, petrov.n.i@muctr.ru, ORCID: 0000-0002-5360-0806

Antonova Tamara Leonidovna

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Physical Chemistry, D. I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, +7 (916) 654-89-26, antonova.t.l@muctr.ru, ORCID: 0009-0003-4666-6983

Sunyaeva Murshida Enverovna

Assistant Teacher of the Department of Physics, D. I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, +7 (499) 978-59-30, mursidasunaeva@gmail.com, ORCID: 0009-0004-3471-069X