

УДК 621.436

DOI 10.18698/0536-1044-2017-10-34-42

Расчет теплового и напряженно-деформированного состояния моноблока быстроходного судового дизеля

Н.Д. Чайнов¹, Н.С. Иванова¹, Н.Г. Мелешченко²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

² ПАО «Звезда», 192012, Санкт-Петербург, Российская Федерация, ул. Бабушкина, д. 123

The Calculation of the Thermal and Stress-Strain State for the Monoblock of a High-Speed Marine Diesel Engine

N.D. Chainov¹, N.S. Ivanova¹, N.G. Meleshchenko²

¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

² PAO Zvezda, 192012, Saint Petersburg, Russian Federation, Babushkin St., Bldg. 123



e-mail: ndchainov@yandex.ru, ivanovanadezhda@live.ru, ngmel@mail.ru



Рассмотрен быстроходный судовый дизельный двигатель 42ЧН16/17, обеспечивающий мощность 2 940 кВт при частоте вращения коленчатого вала 2 200 мин⁻¹. Особенностью дизеля является моноблочная конструкция корпуса, выполненного из алюминиевого сплава АЛ4 с установленными внутри тонкостенными гильзами цилиндров, значительная овализация которых приводит к увеличению расхода смазочного масла и снижению ресурса двигателя. Проведены исследования по уменьшению тепловой напряженности узла моноблок–гильза цилиндра, а также поиск альтернативных конструкторских решений в этом направлении. С применением численного анализа на базе объемных конечно-элементных моделей изучены поля температур, перемещений, деформаций, напряжений корпусных деталей дизеля и намечены пути целесообразного снижения в первую очередь их деформаций.

Ключевые слова: узел моноблок–цилиндр, овальность гильзы цилиндра, перемещения узлов, температурное поле моноблока, температурное поле гильзы, метод конечных элементов



This article examines a high-speed marine diesel engine 42ChN16/17 that provides 2940 kW of power at the crankshaft rotational frequency of 2 200 min⁻¹. The diesel engine features a monoblock case made of the AL4 aluminium alloy, with thin-walled cylinder liners whose considerable out-of-roundness leads to an increase in lubricant consumption and a reduction in engine life. A study aimed at decreasing the thermal stress state of the monoblock-cylinder unit is conducted as well as a search for alternative design solutions to support this. A numerical analysis based on the finite element method is performed to study fields of temperatures, displacements, deformations and stresses of the engine case parts. Ways to decrease, first and foremost, deformations of the parts are outlined.

Keywords: monoblock-cylinder unit, cylinder liner out-of-roundness, displacement of units, monoblock temperature field, liner temperature field, finite element method

Дизельный двигатель 42СН16/17 — четырехтактный, звездообразный с водяным охлаждением, четырехклапанной схемой газораспределения и турбонаддувом — способен развивать мощность 2 940 кВт при частоте вращения коленчатого вала 2 200 мин⁻¹. Корпус дизеля выполнен в виде моноблока, что позволяет избежать проблем, связанных с раскрытием газового стыка, так как блок цилиндров и его головка представляют единую деталь. Установленные внутри моноблока тонкостенные гильзы цилиндров изготовлены из стали 38Х2МЮА-Ш.

Вследствие повышенных требований к массогабаритным показателям, связанных с особенностями эксплуатации такого двигателя, в качестве материала моноблока использован легкий, но не обладающий высокой жесткостью алюминиевый сплав АЛ4.

Цель работы — рассмотреть тепловое и напряженно-деформированное состояние узла моноблок–цилиндр (моноблок–гильза) и представить альтернативные конструкции, позволяющие решить проблему недостаточной жесткости моноблока.

Исследование деформаций гильз цилиндров, возникающих от запрессовки и затяжки силовых шпилек. Для максимального учета конструкторского исполнения такого узла исследование проводили с использованием метода конечных элементов в пространственной постановке задач стационарной теплопроводности и теории упругости [1].

В расчетах учитывали зависимость физико-механических свойств стали 38Х2МЮА-Ш и алюминиевого сплава АЛ4 — модуля упруго-

Таблица 1

Физико-механические свойства материалов

T, °C	E, МПа	μ	l, Вт/(м·К)	α·10 ⁵	σ _в , МПа	σ _т , МПа
20	206 000	0,27	43,26	1,30	809	652
	71 600	0,33	201,20	2,20	240	210
100	206 000	0,27	43,26	1,31	809	652
	71 200	0,33	201,20	2,30	220	180
200	206 000	0,27	43,26	1,33	785	580
	68 700	0,33	204,70	2,40	170	120
300	198 160	0,27	40,60	1,35	770	570
	54 000	0,33	210,50	-	80	30
400	189 333	0,27	36,60	-	726	550
	-	-	223,30	-	-	-

Примечание. В числителе указаны значения для стали 38Х2МЮА-Ш, в знаменателе — для алюминиевого сплава АЛ4.

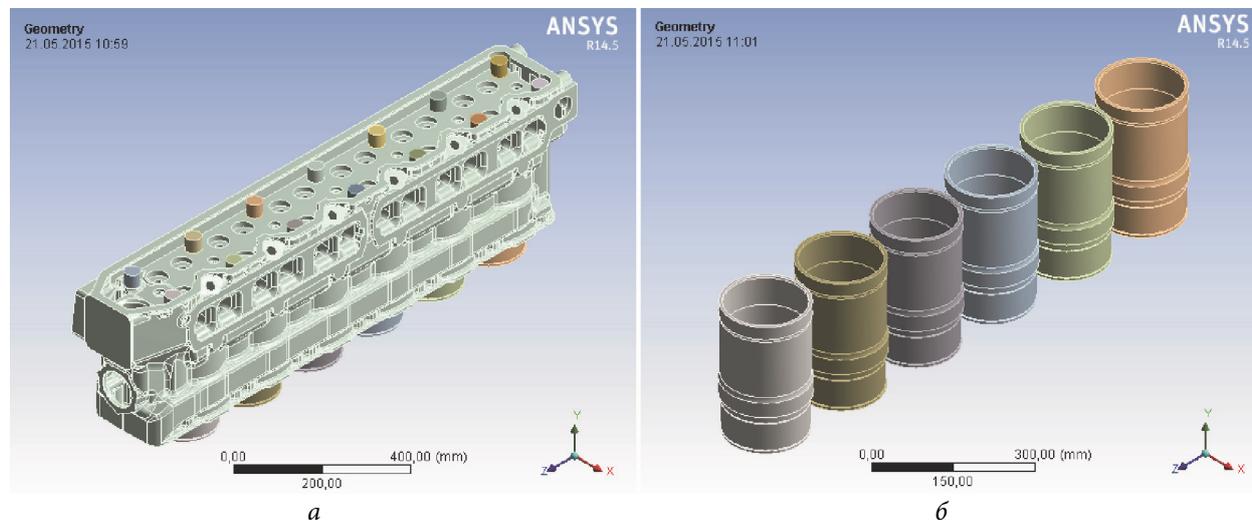


Рис. 1. Твёрдые модели моноблока (а) и двухпорных гильз цилиндров (б)

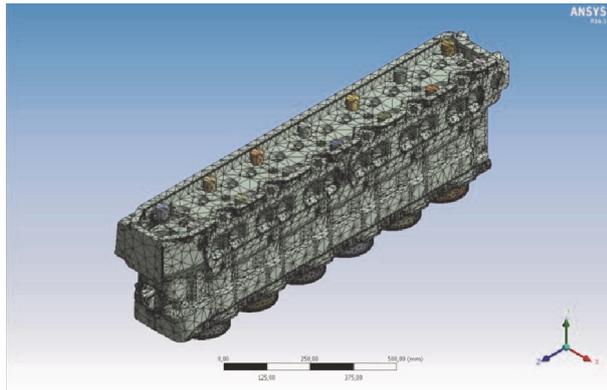


Рис. 2. Конечно-элементная модель моноблока

Таблица 2

Значения параметров узлов и гильзы цилиндров согласно техническим требованиям

Пояс гильзы	Расстояние от нижней кромки гильзы до пояса, мм	Допускаемая овальность, мм, не более	Минимальный диаметр, мм
Верхний	275 ⁺⁵	0,12	159,72
Средний	190±5	0,15	159,93
Нижний	105 ⁺⁵	0,18	159,88

сти E , коэффициента Пуассона μ , коэффициента теплопроводности l , коэффициента линейного расширения α , пределов прочности σ_b и текучести σ_t — от температуры T [2] (табл. 1).

Твердотельные модели моноблока и двухопорных гильз цилиндров представлены на рис. 1. Модели построены по действующей чертежно-технической документации с последующим импортированием в программу ANSYS.

Генерация конечно-элементной сетки выполнена в среде Workbench (рис. 2) и является единой для задач теплопроводности и теории упругости.

Натяги задавали в соответствии с действующей чертежной документацией в пределах поля допуска. Диаметральный натяг по верхнему поясу запрессовки гильзы составлял 0,28 мм, по нижнему поясу — 0,16 мм. Удлинение силовых шпилек от затяжки принимали равным 1 мм.

В табл. 2 приведены значения параметров узлов и гильзы цилиндров согласно техническим требованиям.

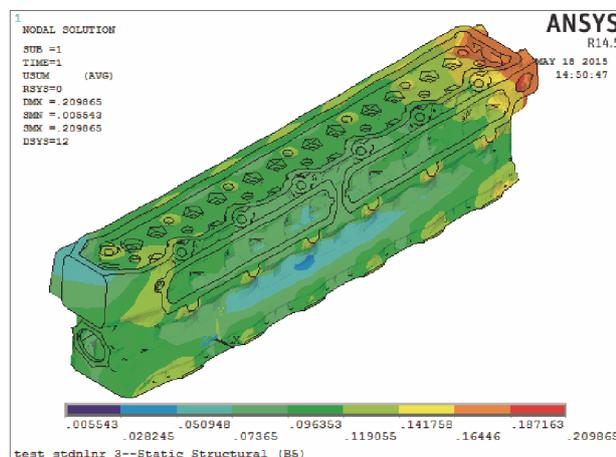
Проверку минимальных значений диаметра проводили после затяжки силовых шпилек моноблока. Результаты расчета приведены на рис. 3, где, как и на последующих рисунках, деформированное состояние деталей в значительной степени масштабировано для лучшей наглядности характера деформаций.

Для оценки овальности выбраны узлы на контролируемых поясах для гильзы второго цилиндра и получены их перемещения (табл. 3).

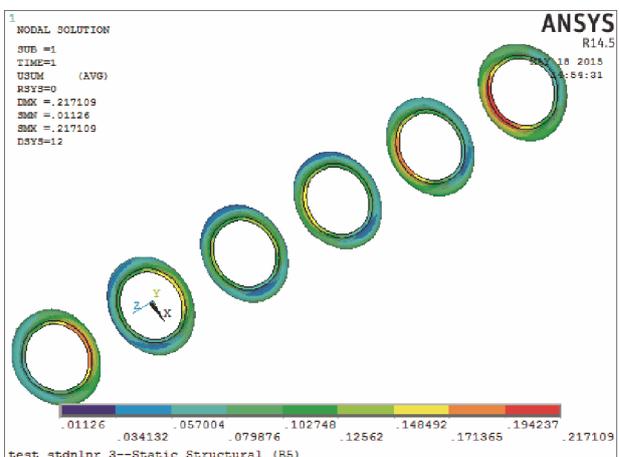
Таблица 3

Значения перемещений узлов и овальности гильзы второго цилиндра

Пояс	Перемещение, мм,		Овальность, мм
	по оси X	по оси Z	
Верхний	-0,124	-0,252	0,128
Средний	0,117	-0,073	0,190
Нижний	0,006	-0,125	0,131



а



б

Рис. 3. Деформированное состояние алюминиевого моноблока (а) и гильз цилиндров (б) после затяжки и запрессовки (вид сверху)

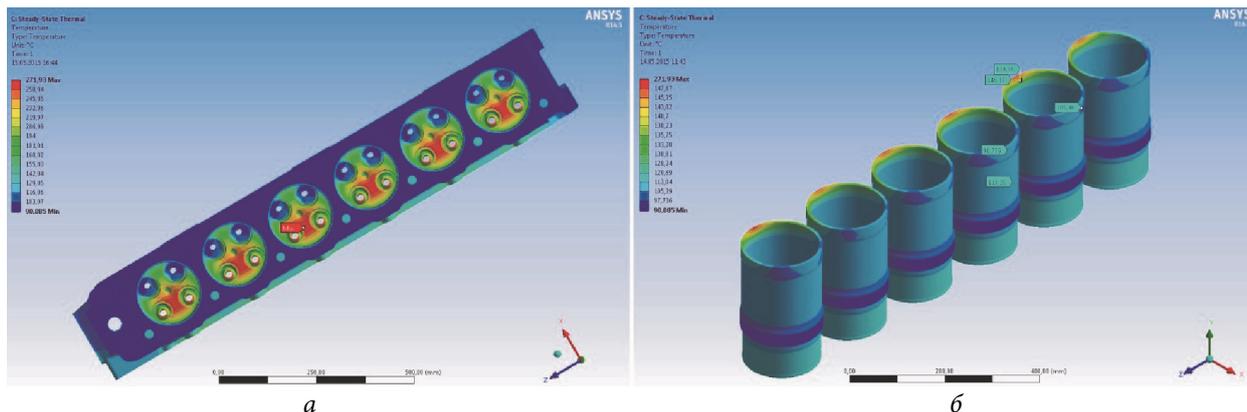


Рис. 4. Температурное поле, °С, алюминиевого моноблока (а) и гильз цилиндров (б) в номинальном режиме работы дизеля

Исследование теплового состояния. Целью исследования теплового состояния моноблока с запрессованными в него двухпорными гильзами цилиндров являлась оценка работоспособности конструкции по температуре наиболее нагретых областей. Кроме того, полученное температурное поле использовали для оценки напряженно-деформированного состояния узла в режиме номинальной мощности. Задачу решали в стационарной постановке [1].

Граничные условия со стороны газа определяли в программных комплексах Diesel-RK и Импульс. Максимальное давление цикла принимали равным 10 МПа. Температурное поле гильзы цилиндров [3] назначали согласно экспериментальным данным, полученным в режиме номинальной мощности двигателя. Дополнительно задавали значения коэффициентов теплоотдачи и температуры охлаждающей жидкости в полостях моноблока [4, 5]. Последнюю на входе в дизель принимали равной 60 °С, а на выходе из него — 80 °С как максимально допустимую температуру [6, 7].

Задачу стационарной теплопроводности решали в контактной постановке. Коэффициент тепловой проводимости контакта узла моноблок–гильза $K = 4\ 300\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ [8].

Результаты расчета температурного поля моноблока и гильз цилиндров приведены на рис. 4.

Анализ полученных результатов позволил выявить следующее:

- максимальная температура моноблока, составляющая 272 °С, наблюдается на его огневых поверхностях между выпускными клапанами (допустимая температура для алюминиевых сплавов не должна превышать 350 °С [1]);

- со стороны выпускных клапанов материал моноблока в зоне верхнего уплотнительного пояса гильз цилиндров нагревается до 160...185 °С;
- максимальная температура гильз цилиндров, составляющая 160 °С, имеет место на огневой поверхности гильзы вблизи верхней кромки; температура поверхности зеркала цилиндра в зоне контакта с первым компрессионным кольцом при его положении в верхней мертвой точке не превышает 150 °С; приведенные значения являются допустимыми для нормального функционирования двигателя.

Исследование напряженно-деформированного состояния моноблока при запрессовке в него гильз цилиндров в режиме номинальной мощности. Задачу решали в контактной постановке средствами программного комплекса ANSYS. Кинематические граничные условия закрепления конструкции иллюстрирует рис. 5, где желтым цветом обозначены граничные

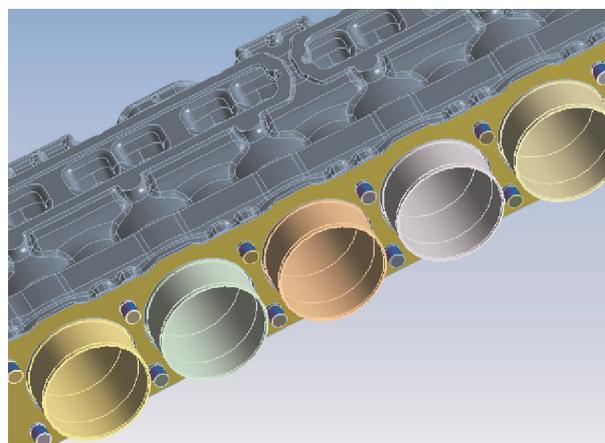
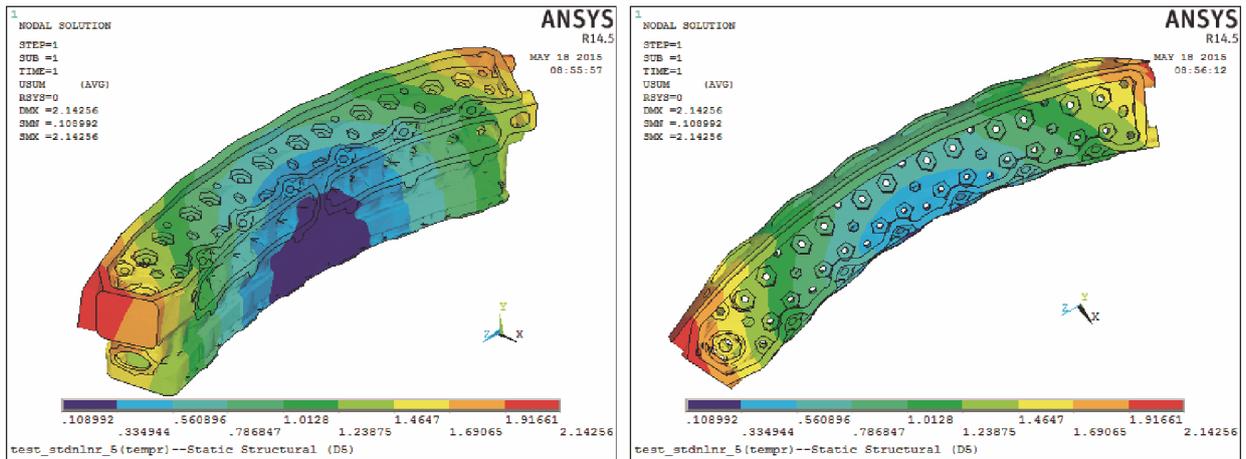
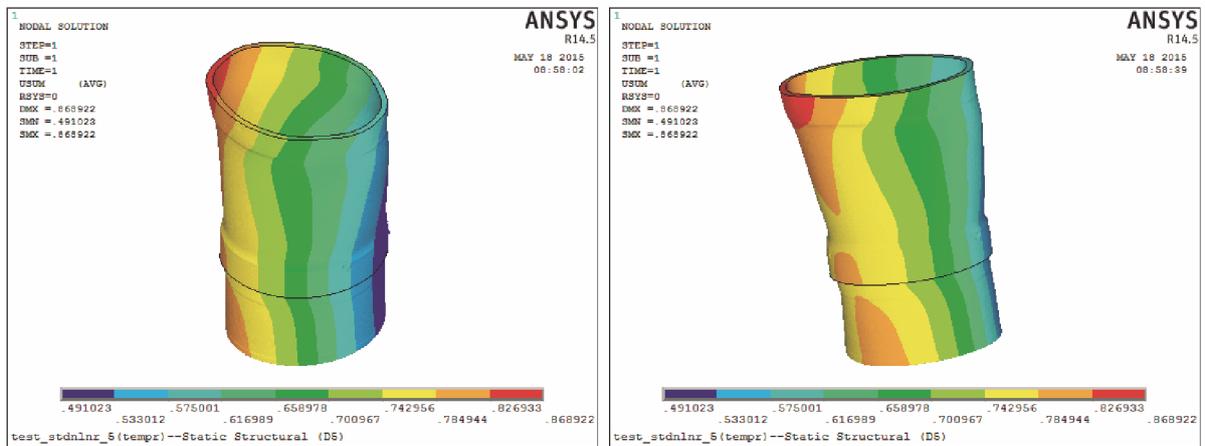


Рис. 5. Кинематические граничные условия

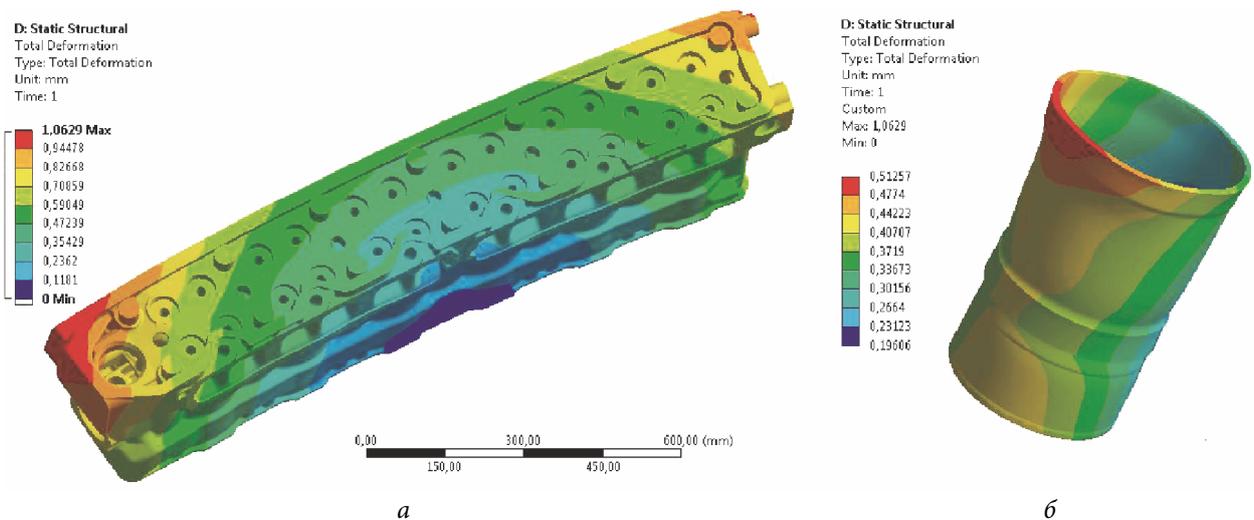


a



b

Рис. 6. Перемещения, мм, алюминиевого моноблока (а) и гильзы второго цилиндра (б)



a

b

Рис. 7. Перемещения, мм, чугунного моноблока (а) и гильзы второго цилиндра (б)

условия, запрещающие перемещения моноблока вдоль оси цилиндров, синим — условие жесткой заделки силовых шпилек, что соответствует установке узла на жестком картере.

Путем итерационного решения нелинейной задачи получены результаты, приведенные на рис. 6.

Данный характер деформации обусловлен тем, что моноблок нагрет неравномерно, так как со стороны выпуска температура значительно выше, чем со стороны впуска, это ведет к более интенсивному расширению материала с более нагретой стороны и, как следствие, к изгибу.

Для оценки степени овализации выбрана гильза второго цилиндра, деформированное состояние (перемещения) которой приведено на рис. 6, б, а значения ее овальности — в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что овализация гильзы является значительной. В связи с этим проведено исследование альтернативных вариантов конструкции [9]: раздельно выполненных блока

Таблица 4

Значения перемещений узлов и овальности гильзы второго цилиндра

Пояс	Перемещение, мм,		Овальность, мм
	по оси X	по оси Z	
Верхний	0,312	0,094	0,218
Средний	0,212	0,144	0,068
Нижний	0,113	-0,213	0,326

Таблица 5

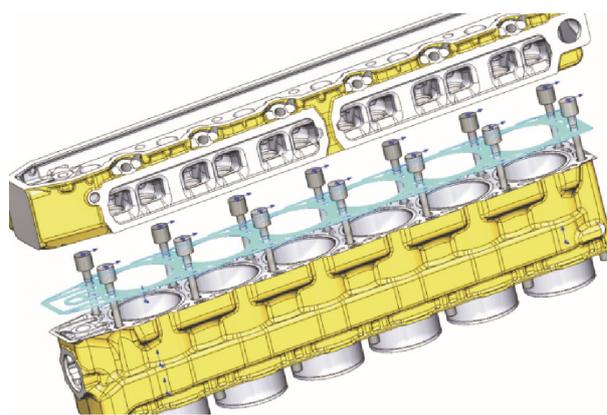
Значения перемещений узлов и овальности гильзы второго цилиндра

Пояс	Перемещение, мм,		Овальность, мм
	по оси X	по оси Z	
Верхний	0,143	0,113	0,030
Средний	0,173	0,096	0,077
Нижний	0,116	0,234	0,118

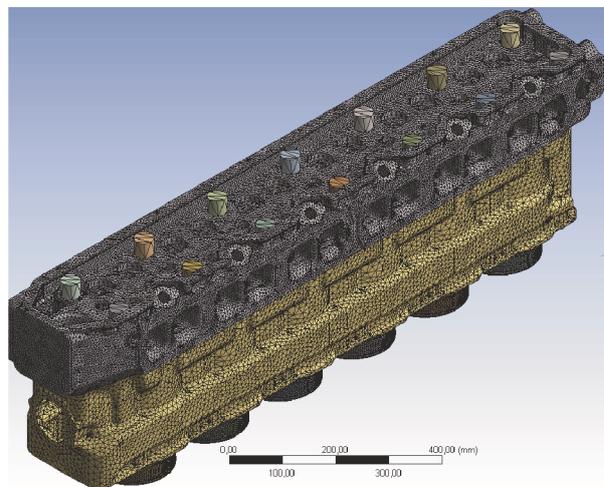
Таблица 6

Значения перемещений узлов и овальности гильзы второго цилиндра

Пояс	Перемещение, мм,		Овальность, мм
	по оси X	по оси Z	
Верхний	0,373	0,395	0,078
Средний	0,134	0,224	0,090
Нижний	0,097	0,281	0,184



а



б



в

Рис. 8. Твердотельная (а) и конечно-элементная (б) модели разделенной конструкции, в которой использованы гильзы с опорным буртом (в)

цилиндров и его головки и моноблока, изготовленного из высокопрочного чугуна [10, 11]. Описанные решения имеют свои достоинства и недостатки. Чугун обладает большей жесткостью, чем алюминиевые сплавы, при этом его плотность в 2,7 раза выше, что негативно ска-

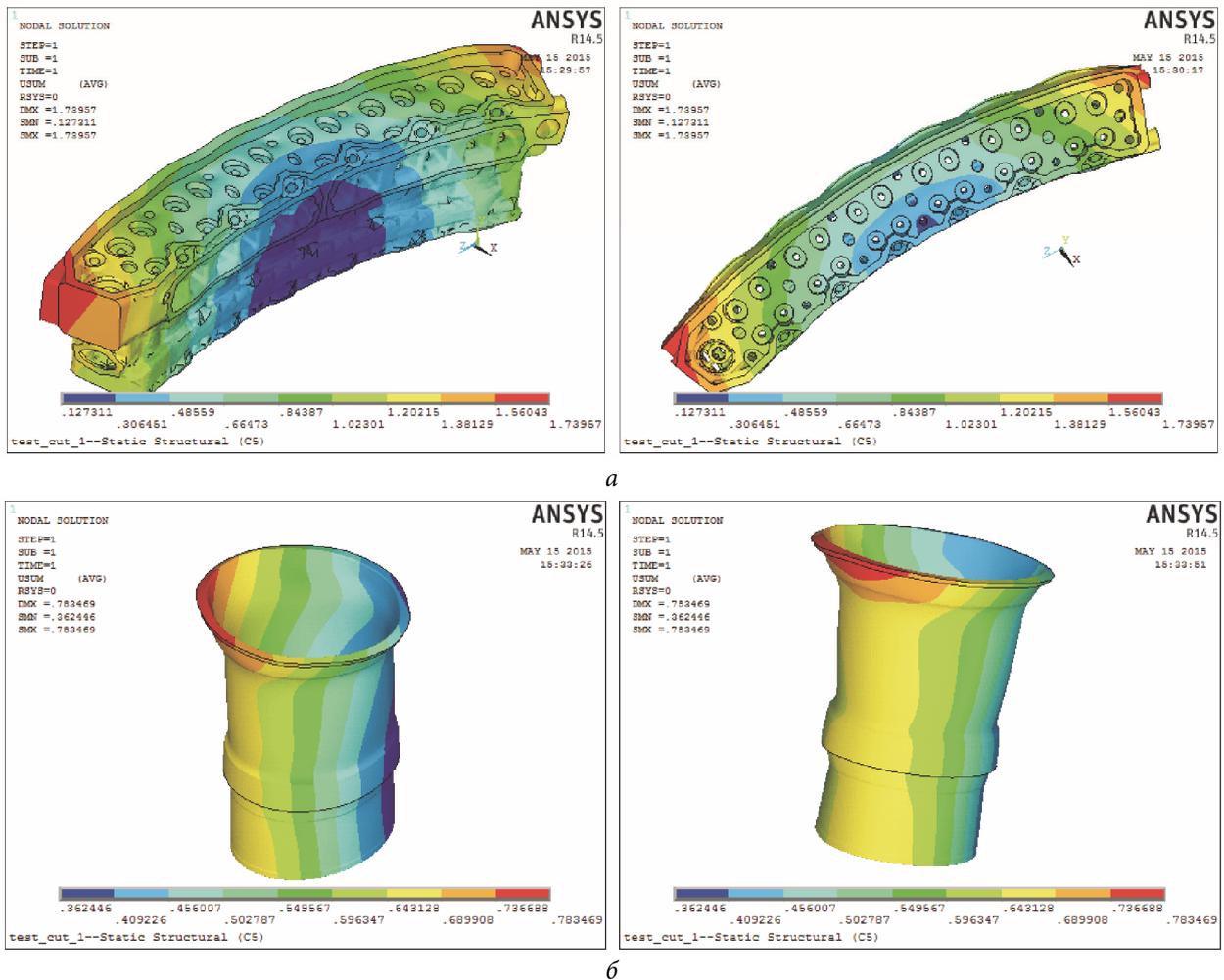


Рис. 9. Перемещения, мм, узла блок цилиндров — его головка (а) и гильзы второго цилиндра (б)

зывается на массогабаритных характеристиках, но современные методы тонкостенного литья позволяют несколько облегчить конструкцию. Применение разделенной конструкции требует решения проблемы уплотнения газового стыка, который отсутствует в моноблоке.

Твердотельная и конечно-элементная модели чугунного моноблока с гильзами соответствуют рис. 1 и 2. Перемещения моноблока и гильзы второго цилиндра представлены на рис. 7, значения перемещений узлов и овальность гильзы — в табл. 5. Можно заметить, что овальность гильзы значительно уменьшилась, как и изгибные перемещения моноблока. Подобное явление имеет благоприятное влияние на условия работы поршневых колец, снижает прорыв газов из подпоршневого пространства и расход масла на угар.

Твердотельная модель разделенной конструкции, в которой использована гильза с

опорным буртом, и ее конечно-элементная модель представлены на рис. 8.

На рис. 9 показаны перемещения узла блок цилиндров — его головка, на рис. 9, б — перемещения гильзы второго цилиндра, в табл. 6 — значения ее овальности. В этом случае также наблюдается уменьшение овальности гильзы и изгибных перемещений моноблока.

Выводы

1. Анализ результатов расчета показал, что особенностью моноблочной алюминиевой конструкции является недостаточная жесткость, что приводит к значительной оваллизации гильз цилиндров и потере уплотняющей способности поршневых колец.

2. Установлено, что для повышения жесткости конструкции можно либо использовать отдельно выполненные алюминиевые блок

цилиндров и его головку (где перемещения, вызванные температурными нагрузками разогретой головки, в меньшей мере передаются блоку и гильзам цилиндров), либо заменить материал

(алюминиевый сплав) моноблока на высокопрочный чугун, имеющий большую жесткость и меньшее температурное расширение.

Литература

- [1] Чайнов Н.Д., Иващенко Н.А., Краснокутский А.Н., Мягков Л.Л. *Конструирование двигателей внутреннего сгорания*. Москва, Машиностроение, 2011. 496 с.
- [2] Драгунов Ю.Г., Зубченко А.С., ред. *Марочник сталей и сплавов*. Москва, Машиностроение, 2014. 1216 с.
- [3] Гинзбург М.А., Раенко М.И. Расчет теплового состояния, температурных деформаций и напряжений в элементах втулок цилиндров. *Двигателестроение*, 1989, № 4, с. 16–23.
- [4] Кавтарадзе Р.З. *Локальный теплообмен в поршневых двигателях*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 592 с.
- [5] Леонтьев А.И. *Теория тепломассообмена*. Москва, Высшая школа, 1979. 496 с.
- [6] Тартаковский И.П., Шульман Л.Г. *Судовые звездообразные дизели М500. Диагностика неисправностей*. Санкт-Петербург, Изд-во Судостроение, 2009. 255 с.
- [7] Маластовский Н.С. *Методика определения локальных граничных условий со стороны охлаждения при расчете температурных полей крышек цилиндров двигателей*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2011. 16 с.
- [8] Попов В.М. *Теплообмен в зоне контакта неразъемных соединений*. Москва, Энергия, 1971. 217 с.
- [9] Конкс Г.А., Лашко В.А. *Мировое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта*. Москва, Машиностроение, 2005. 505 с.
- [10] ИТЦМ. *Чугуны с шаровидным графитом и вермикулярным графитом с аустенитно-бейнитной матрицей — современные материалы для литых деталей*. Москва, Металлург, 2004. 440 с.
- [11] Тарасенко Л.В., Унчикова М.В. *Материалы для поршневых двигателей*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 104 с.

References

- [1] Chainov N.D., Ivashchenko N.A., Krasnokutskii A.N., Miagkov L.L. *Konstruirovaniye dvigatelei vnutrennego sgoraniia* [Design of internal combustion engines]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2011. 496 p.
- [2] *Marochnik staley i splavov* [Marochnik steels and alloys]. Ed. Dragunov Iu.G., Zubchenko A.S. Moscow, Mashinostroenie publ., 2014. 1216 p.
- [3] Ginzburg M.A., Raenko M.I. Raschet teplovogo sostoiianiia, temperaturnykh deformatsii i napriazhenii v elementakh vtulok tsilindrov [The calculation of the thermal state, thermal strains and stresses in the elements of sleeves of cylinders]. *Dvigatellestroenie* [Dvigatellestroyeniye]. 1989, no. 4, pp. 16–23.
- [4] Kavtaradze R.Z. *Lokal'nyi teploobmen v porshnevykh dvigateliakh* [Local heat transfer in reciprocating engines]. Moscow, Bauman Press, 2001. 592 p.
- [5] Leont'ev A.I. *Teoriia teplomassoobmena* [Heat and mass transfer theory]. Moscow, Vysshiaia shkola publ., 1979. 496 p.
- [6] Tartakovskii I.P., Shul'man L.G. *Sudovye zvezdoobraznye dizeli M500. Diagnostika neispravnosti* [Marine crosshead diesel engines M500. Fault diagnosis]. Sankt-Petersburg, Sudostroenie publ., 2009. 255 p.
- [7] Malastovskii N.S. *Metodika opredeleniia lokal'nykh granichnykh uslovii so storony okhlazhdeniia pri raschete temperaturnykh polei kryshek tsilindrov dvigatelei*. Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk [The method of determining the local boundary conditions on the part of the cooling in the calculation of temperature fields of cylinder covers of engines. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2011. 16 p.
- [8] Popov V.M. *Teploobmen v zone kontakta neraz'emnykh soedinenii* [Heat transfer in the contact zone of permanent connections]. Moscow, Energiia publ., 1971. 217 p.

- [9] Konks G.A., Lashko V.A. *Mirovye dizelestroenie. Kontseptsii konstruirovaniia, analiz mezhdunarodnogo opyta* [Global diesel-engine. Concept design, analysis of international experience]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2005. 505 p.
- [10] ИТТсМ. *Chuguny s sharovidnym grafitom i vermikuliarnym grafitom s austenitno-beinitnoi matritsei — sovremennye materialy dlia litykh detalei* [ITCM. Cast iron with nodular graphite and compacted graphite iron with austenitic — bainite matrix materials for castings]. Moscow, Metallurg publ., 2004. 440 p.
- [11] Tarasenko L.V., Unchikova M.V. *Materialy dlia porshnevnykh dvigatelei* [Materials for piston engines]. Moscow, Bauman Press, 2013. 104 p.

Статья поступила в редакцию 27.06.2017

Информация об авторах

ЧАЙНОВ Николай Дмитриевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Поршневые двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: ndchainov@yandex.ru).

ИВАНОВА Надежда Сергеевна (Москва) — аспирант кафедры «Поршневые двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: ivanovanadezhda@live.ru).

МЕЛЕШЧЕНКО Николай Геннадьевич (Санкт-Петербург) — кандидат технических наук, ведущий инженер. ПАО «Звезда» (192012, Санкт-Петербург, Российская Федерация, ул. Бабушкина, д. 123, e-mail: ngmel@mail.ru).

Information about the authors

CHAINOV Nikolay Dmitrievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Piston Engines Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: ndchainov@yandex.ru).

IVANOVA Nadezhda Sergeevna (Moscow) — Postgraduate, Piston Engines Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: ivanovanadezhda@live.ru).

MELESHCHENKO Nikolay Gennadievich (Saint Petersburg) — Candidate of Science (Eng.), Leading Engineer. PAO Zvezda (192012, Saint Petersburg, Russian Federation, Babushkin St., Bldg. 123, e-mail: ngmel@mail.ru).