

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОГНЕВОМ ДНИЩЕ КРЫШКИ ЦИЛИНДРА ДИЗЕЛЯ ГОРНОТРАНСПОРТНОЙ МАШИНЫ

ГУТАРЕВИЧ В. О., РЯБКО Е. В.

*Разрушение крышек цилиндров дизелей шахтных подвесных локомотивов или наземного горного транспорта сопровождается образованием сквозных трещин в огневом днище. Для разработки мероприятий, направленных на повышение надежности деталей цилиндропоршневой группы дизелей горнотранспортных машин необходимо выполнить расчет механических напряжений в огневом днище крышки цилиндра. Крышка цилиндра дизельного двигателя горнотранспортной машины представляет собой сложную форму, огневое днище которой можно представить в виде круглой пластины, имеющей четыре круглых отверстия (в некоторых случаях два). Воздействие давления на огневое днище крышки цилиндра дизеля горнотранспортной машины можно сравнить с влиянием распределенных нагрузок на круглые пластины. В статье рассмотрена методика расчета механических напряжений в огневом днище крышки цилиндров дизеля горнотранспортной машины. Для изучения явления возникновения механических напряжений в деталях дизеля горнотранспортных машин за счет их прогрева целесообразно использовать конечно-разностную схему комплекса программ ANSYS.*

**Ключевые слова:** горнотранспортная машина; дизельный двигатель; крышка цилиндра; температурные напряжения; взаимодействие сил; конечно-элементная модель.

В настоящее время шахтные подвесные дороги с дизелевозами находят все большее применение в горной промышленности. Благодаря дизельному приводу они могут осуществлять перевозки по искривленным выработкам со знакопеременным профилем и углами наклона более  $15^\circ$  [1, 2]. Однако тяжелые условия эксплуатации оказывают пагубное воздействие на работу дизеля, приводят к его перегреву и появлению трещин в огневом днище, а также к разрушению крышек цилиндров. Это в полной мере относится не только к монорельсовым дизелевозам, но и к другим дизельным приводам горнотранспортных машин.

Природа образования трещин заключается в их усталостном развитии вследствие того, что огневое днище испытывает знакопеременные нагрузки. При этом знакопеременные нагрузки возникают как от циклических и малоцикловых изменений температуры деталей дизеля, так и от действия механических сил давления газов в цилиндре. В некоторых случаях возможен преждевременный выход из строя крышки цилиндров или головки блока вследствие перегревов или несоблюдения установленного температурного режима. Для разработки мероприятий, направленных на повышение надежности деталей цилиндропоршневой группы дизелей горнотранспортных машин необходимо выполнить расчет механических напряжений в огневом днище крышки цилиндра.

Крышка цилиндра дизельного двигателя горнотранспортной машины имеет сложную форму: ее огневое днище можно представить в виде круглой пластины, имеющей четыре круглых отверстия (в некоторых случаях – два). С принятыми упрощениями огневое днище можно представить в виде, изображенном на рис. 1.

На огневое днище воздействует среднеиндикаторное давление газов, достигающее 2 МПа и более. Наряду с этим присутствуют и большие значения давления

---

**Гутаревич Виктор Олегович** – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры горнозаводского транспорта и логистики. 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, Донецкий национальный технический университет. E-mail: viktor.gutarevich@mail.ru

**Рябко Евгения Владимировна** – инженер первой категории. 283018, г. Донецк, ул. Горная, 6, Донецкий институт железнодорожного транспорта. E-mail: railroader@yandex.ru

рабочих газов 12–15 МПа, при этом продолжительность их воздействия составляет менее 10 % продолжительности цикла в цилиндре дизельного двигателя.

Для среднеоборотных двигателей продолжительность цикла в цилиндре составляет 0,12 с, тогда продолжительность воздействия газов на огневое днище с максимальным давлением сгорания будет составлять примерно 0,01 с с повторением через каждые 0,12 с. Для форсированных высокооборотных дизелей шахтных подвесных локомотивов типа Z1303-turbo и Z1404-turbo продолжительность цикла протекает гораздо быстрее.

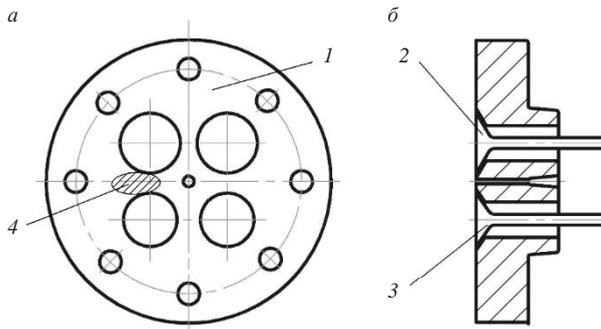


Рис. 1. Схема огневого днища крышки цилиндра:  
*a* – общий вид; *б* – разрез по клапанным отверстиям; 1 – крышка цилиндра; 2 – впускной клапан; 3 – выпускной клапан; 4 – зона появления усталостных трещин

Огневое днище с такой же периодичностью подвергается воздействию горячих газов с температурой, как правило, выше 1000 °С.

Такое воздействие температуры формирует в огневом днище большие знакопеременные градиенты температур по толщине стенки со стороны камеры сгорания.

При этом при прогреве поверхности огневого днища в ней возникают напряжения сжатия, а при охлаждении – напряжения растяжения.

Согласно теории термоупругости [3], напряжения сжатия или растяжения тем больше, чем больше значения градиентов температур по толщине стенки. Для определения напряжений в огневом днище необходимо изучить закономерности распределения температурных полей, определить значения градиентов температур в нем и значений напряжений сжатия и растяжения.

Появлению напряжений в огневом днище способствует также давление газов. При воздействии высоких давлений (за счет некоторого изгиба огневого днища) возникают напряжения сжатия.

Воздействие давления на огневое днище крышки цилиндра горнотранспортной машины можно сравнить с влиянием распределенных нагрузок на круглые пластины. Как показано в работах [4, 5], распределенные или сосредоточенные нагрузки вызывают в тонкой пластине изгиб с небольшим прогибом  $\omega$  и соответственно напряжения растяжения.

Схема изгиба круглой пластины под воздействием распределенной нагрузки показана на рис. 2 [5].

Кривизна в некоторой точке пластины выражается соотношением:

$$\frac{1}{\rho_1} = \frac{d^2\omega}{dr^2}, \quad (1)$$

где  $\rho_1$  – радиус изгиба по радиусу  $r$  круглой пластины;  $\omega$  – прогиб пластины в некоторой точке на расстоянии  $r$  от ее центра.

Потенциальная кривизна поверхности пластины в направлении, перпендикулярном радиусу  $r$ , выражается уравнением:

$$\frac{1}{\rho_2} = \frac{1}{r} \frac{d\omega}{dr}, \quad (2)$$

где  $\rho_2$  – радиус кривизны по периметру с радиусом  $r$ .

Прогиб пластины вызывает в ней нормальные напряжения растяжения  $\sigma_r$  – по радиусу и  $\sigma_\tau$  – тангенциальное напряжение:

$$\sigma_r = \frac{E z}{1-\mu^2} \left( \frac{d\varphi}{dr} + \mu \frac{\varphi}{r} \right); \quad (3)$$

$$\sigma_\tau = \frac{E z}{1-\mu^2} \left( \frac{\varphi}{r} + \mu \frac{d\varphi}{dr} \right), \quad (4)$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $z$  – прогиб в центре пластины;  $\varphi$  – угол прогиба на расстоянии  $r$  от центра пластины.

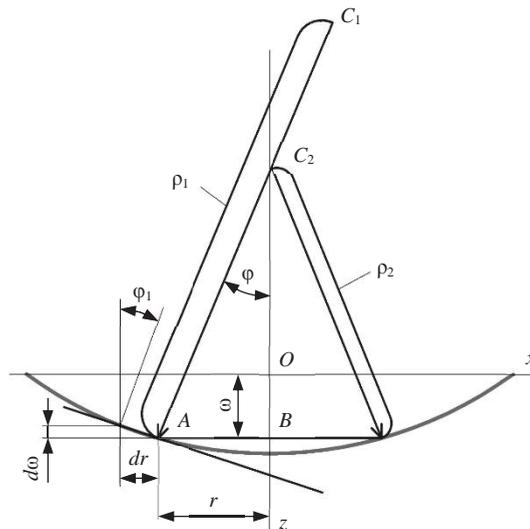


Рис. 2. Элементы круглой пластины при нагружении распределенной нагрузкой:

$C_1$  – центр окружности с радиусом  $\rho_1$ ;  $C_2$  – центр окружности с радиусом  $\rho_2$ ;  $\rho_1$  – радиус изгиба по радиусу  $r$  круглой пластины;  $\rho_2$  – радиус кривизны по периметру с радиусом  $r$ ;  $A, B$  – характерные точки на круглой пластине

Кроме нормальных напряжений  $\sigma_r$  и  $\sigma_\tau$  (формулы (3) и (4)) распределенные нагрузки вызывают касательные напряжения в плоскости  $r z$  (рис. 3) [5, 6].

По данным [5], равнодействующая касательных напряжений равна поперечной силе  $Q = \tau_{rz} \cdot r \cdot d\varphi \cdot h$ , которая играет важную роль в уравнениях равновесия элемента пластины (здесь  $h$  – толщина пластины).

Нормальные напряжения  $\sigma_r$  и  $\sigma_\tau$  вызывают изгибающие моменты  $M_r$  и  $M_\tau$ . Схема действия этих моментов показана на рис. 4 [5].

В общем случае изгибающие моменты  $M_r$  и  $M_t$  определяются по формулам:

$$M_r = \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma_r \cdot z \cdot dz; \quad M_t = \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma_t \cdot z \cdot dz. \quad (5)$$

После подстановки в интегралы (5) значений нормальных напряжений  $\sigma_r$  и  $\sigma_t$  по формулам (3) и (4) получаем, в частности, следующие выражения для момента  $M_r$ :

$$\begin{aligned} M_r &= \int_{-h/2}^{+h/2} \frac{Ez^2}{1-\mu^2} \left( \frac{d\varphi}{dr} + \mu \frac{\varphi}{r} \right) dz = \frac{E}{1-\mu^2} \left( \frac{d\varphi}{dr} + \mu \frac{\varphi}{r} \right) \frac{z^3}{3} \Big|_{-h/2}^{+h/2} = \\ &= \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \left( \frac{d\varphi}{dr} + \mu \frac{\varphi}{r} \right) = D \left( \frac{d\varphi}{dr} + \mu \frac{\varphi}{r} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \left( \frac{d\varphi}{dr} + \mu \frac{\varphi}{r} \right)$  – цилиндрическая жесткость.

Для момента  $M_t$  можно получить зависимость, аналогичную зависимости (6).

Уравнения (1)–(6) будут иметь место и для пластины с отверстиями. При этом взаимодействие сил на границе отверстий должно быть задано в виде граничных условий. В рассматриваемом случае для решения задачи определения напряжений в пластине огневого днища крышки цилиндра горнотранспортной машины необходимо эти граничные условия выразить в аналитической форме.

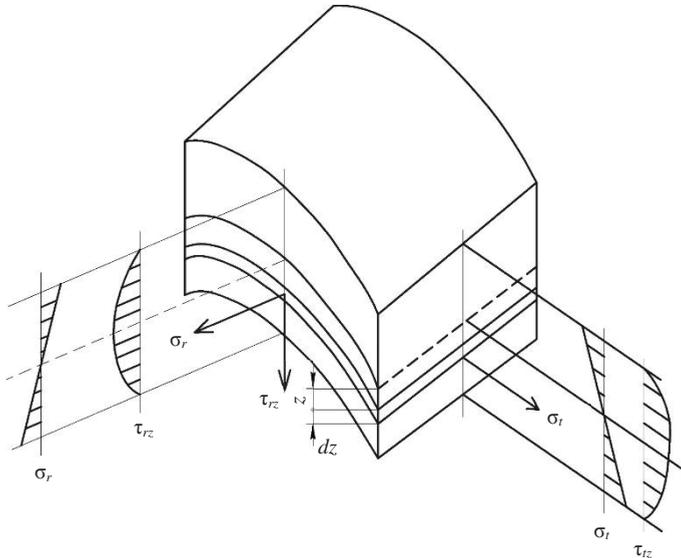


Рис. 3. Схема распределения касательных напряжений в плоской пластине

Выделим элемент периметра отверстия, как показано на рис. 5, и определим силы, действующие на этот элемент.

На выделенный элемент действует распределенная нагрузка от давления газов. При этом часть нагрузки, действующей на клапан, можно считать распределенной по периметру седла.

Общая ее величина

$$F_{\text{общ}} = SP = \frac{\pi d^2}{4} P,$$

где  $S$  – площадь клапана и его седла;  $d$  – диаметр седла.

Распределенная по периметру клапанного седла нагрузка составит:

$$\frac{F - F_{\text{общ}}}{\pi d} = \frac{\pi d^2}{4\pi d} = \frac{d}{4} P. \quad (7)$$

Сила  $F$ , определенная по формуле (7), будет срезающей по отношению к остальной части крышки цилиндра.

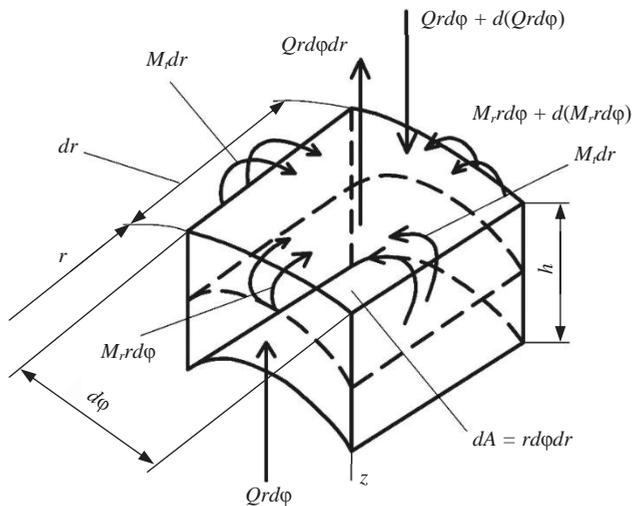


Рис. 4. Схема изгибающих моментов  $M_r$  и  $M_t$

Примем допущение, что седло клапана под действием внешней нагрузки (давления газов) не деформируется, однако при его нагревании возникают внутренние напряжения  $P_1$ . Эти силы, в свою очередь, формируют распределенную силу  $P_2$ , действующую на огневое днище.

Таким образом, наличие отверстий в огневом днище можно учитывать действием на плоскость крышки цилиндра двух сил: срезающей силы  $F$  и радиальной силы  $P_2$ , сформированной за счет линейного расширения седла клапана на кромке отверстий в огневом днище.

Учитывая то, что отверстий в огневом днище не одно, а четыре (для некоторых дизелей горных машин – два), совместное решение основных уравнений (3)–(6) и граничных условий на кромках отверстий в аналитической форме невозможно [7].

Для изучения явления возникновения механических напряжений в деталях дизеля горнотранспортных машин за счет их прогрева целесообразно использовать конечно-разностную схему комплекса программ ANSYS. В процессе исследований температурных полей и полей механических напряжений целесообразно принимать среднюю за цикл температуру газов и среднее за цикл значение суммарного коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{\Sigma}$ . Так, например, средняя за цикл температура поверхности крышки цилиндра лежит в пределах 300–350 °С [8].

В системе прочностного анализа ANSYS разработана конечно-элементная модель крышки цилиндра. Составлены алгоритмы расчета в виде отдельных подпрограмм. В качестве внешних нагрузок, действующих на крышку, принимается температура и рабочее давление газов в цилиндре. При расчете напряженного состояния задается температура на поверхностях днища и на внешних поверхностях крышки. Производится расчет температурного поля по всему объему крышки. При этом объем крышки разбивался на конечные термоэлементы SOLID90. Затем выполнялся прочностной расчет. Термоэлементы заменялись соответствующими им прочностными элементами SOLID186. Было установлено, что уровень расчетных температур газов в цилиндре значительно влияет на напряжения в огневом днище крышки цилиндров. Так, снижение расчетной температуры с 300 до 250 °С приводит к снижению напряжений в огневом днище на 24 %. Напряжения от рабочего давления газов в цилиндре на порядок ниже температурных напряжений.

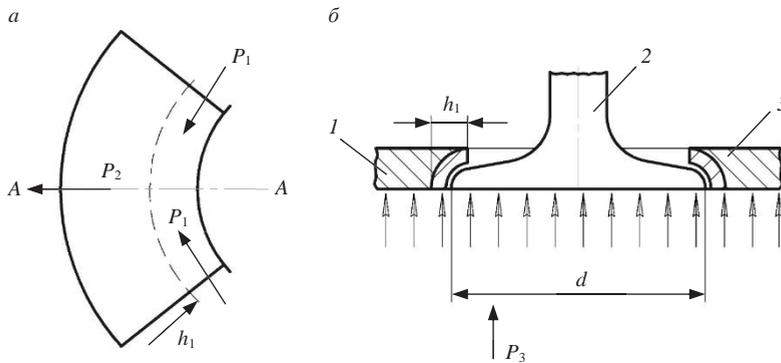


Рис. 5. Схема взаимодействия сил на сопряжении огневого днища крышки цилиндра горнотранспортной машины с седлом клапана на границе отверстия: а – часть огневого днища в плане; б – разрез огневого днища; 1 – пластина огневого днища между клапанными отверстиями; 2 – клапан; 3 – седло клапана

В статье рассмотрена методика расчета механических напряжений в огневом днище крышки цилиндра дизеля горнотранспортной машины. Воздействие давления на огневое днище крышки цилиндра дизеля горнотранспортной машины можно сравнить с влиянием распределенных нагрузок на круглые пластины.

Для изучения явления возникновения механических напряжений в деталях дизеля горнотранспортных машин за счет их прогрева целесообразно использовать конечно-разностную схему комплекса программ ANSYS. Составлены алгоритмы расчета в виде отдельных подпрограмм. Получена конечно-элементная модель крышки цилиндра дизеля карьерного тепловоза. Уровень расчетных температур газов в цилиндре значительно влияет на напряжения в огневом днище, снижение расчетной температуры с 300 до 250 °С приводит к снижению напряжений в огневом днище на 24 %.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баус-Нойфанг Б., Великанов Д. В., Русинек Ю. Подвесные и напочвенные дизель-гидравлические локомотивы для перемонтажей механизированных комплексов «тяжелого» класса // Уголь. 2011. № 2. С. 9–21.
2. Гутаревич В. О. Динамика шахтных подвесных монорельсовых дорог. Донецк: ЛАНДОН-XXI, 2014. 205 с.
3. Коваленко А. Д. Основы термоупругости. Киев: Наукова думка, 1970. 308 с.
4. Чижевский К. Г. Расчет круглых и кольцевых пластин. Л.: Машиностроение, 1977. 184 с.
5. Громовик А. И. Расчет круглых пластин. Омск: СибАДИ, 2011. 33 с.
6. Бояршинов С. В. Основы строительной механики машин. М.: Машиностроение, 1973. 453 с.

7. Конструирование и расчет двигателей внутреннего сгорания / Н. Х. Дьяченко [и др.]. Л.: Машиностроение, 1979. 392 с.

8. Тимохин Ю. В., Савенков В. Н., Гущин А. М., Рябко Е. В. Напряженно-деформированное состояние крышки цилиндра дизеля тепловоза // Вестник ИрГТУ. 2017. Т. 21. № 4. С. 198–207.

Поступила в редакцию 17 января 2018 года

## MECHANICAL TENSION CALCULATION METHODOLOGY FOR THE MINING TRANSPORT MACHINE DIESEL ENGINE CYLINDER COVER FIRE BOTTOM

**Gutarevich V. O.** – Donetsk National Technical University. E-mail: viktor.gutarevich@mail.ru

**Riabko E. V.** – Donetsk Railway Transport Institute. E-mail: railroader@yandex.ru

Destruction of cylinder covers of diesel engines of mine suspension locomotives or ground mining transport is accompanied by the formation of through cracks in the fire bottom. For the development of measures aimed to increase in reliability of details of the cylinder-piston group of diesel engines of mining transport machines, it is necessary to calculate the mechanical tension in the fire bottom of the cylinder cover. Mining transport machine diesel engine cylinder cover represents irregular shape the fire bottom of which can be represented as a circular plate having four round holes (in some cases two). Influence of pressure on the fire bottom of a mining transport machine diesel cylinder cover can be compared to the influence of the distributed loads on round plates. In the article the calculation technique of mechanical tension in the mining transport machine diesel engine cylinder cover fire bottom is considered. For studying of the phenomenon of the occurrence of mechanical stresses in the details of the diesel engine of mining machines due to their heating, it is advisable to use the finite-difference scheme of the ANSYS program complex.

**Key words:** mining transport machine; diesel engine; cylinder cover; temperature stresses; force interaction; finite element model.

### REFERENCES

1. Baus-Noifang B., Velikanov D. V., Rusinek Iu. [Suspension and ground diesel-hydraulic locomotives for the reinstallation of mechanized complexes of “heavy” class]. *Ugol – Coal*, 2011, no. 2, pp. 9–21. (In Russ.)
2. Gutarevich V. O. *Dinamika shakhtnykh podvesnykh monorel'sovykh dorog* [The dynamics of shaft suspension monorail roads]. Donetsk, LANDON–XXI Publ., 2014. 205 p.
3. Kovalenko A. D. *Osnovy termouprugosti* [The fundamentals of thermoelastic behavior]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1970. 308 p.
4. Chizhevskii K. G. *Raschet kruglykh i kol'tsevykh plastin* [The calculation of circular and ring plates]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1977. 184 p.
5. Gromovik A. I. *Raschet kruglykh plastin* [Circular plates calculation]. Omsk, SibADI Publ., 2011. 33 p.
6. Boiarshinov S. V. *Osnovy stroitel'noi mekhaniki mashin* [The fundamentals of machines structural mechanics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 453 p.
7. D'iachenko N. Kh., and others. *Konstruirovaniye i raschet dvigatelei vnutrennego sgoraniya* [Design and calculation of combustion engines]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1979. 392 p.
8. Timokhin Iu. V., Savenkov V. N., Gushchin A. M., Riabko E. V. [Stress-strained state of a locomotive diesel cylinder cover]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2017, vol. 21, no. 4, pp. 198–207. (In Russ.)