

# Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

УДК 621.436

doi: 10.18698/0536-1044-2020-8-29-36

## Моделирование напряженно-деформированного состояния поршня дизеля с учетом неупругих деформаций

Л.Л. Мягков, С.М. Сивачев

МГТУ им. Н.Э. Баумана

## Simulation of the Stress-Strain State of Diesel Engine Pistons Taking into Account Inelastic Deformations

L.L. Myagkov, S.M. Sivachev

Bauman Moscow State Technical University

Разрушение алюминиевых поршней дизельных двигателей часто связано с образованием трещин, зарождающихся на кромке камеры сгорания. Появление этих трещин является следствием термической усталости материала из-за низкочастотных циклов нагрева–охлаждения поршня при пуске двигателя, его работе при различных скоростных и нагрузочных режимах и последующем останове. Для оценки долговечности кромки необходимо воспроизводить неизотермическое упругопластическое деформирование сплава, используя модели пластичности и ползучести материала, доступные в пакетах конечно-элементного анализа, таких как ANSYS. Представлены результаты испытаний на одноосное растяжение и ползучесть пропорциональных образцов, изготовленных из заготовок поршней V-образных дизельных двигателей ЯМЗ-658. Материал поршней — силуминовый сплав АК12ММгН. Изложена методика определения констант в моделях пластичности и ползучести. Приведены результаты численного моделирования методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния поршня для цикла пуск — номинальный режим — останов. Сделаны выводы о наличии пластических деформаций и деформаций ползучести на кромке поршня.

**Ключевые слова:** малоцикловая усталость, неупругое деформирование, пластичность и ползучесть материала, дизельный двигатель, кромка поршня

The failure of aluminum pistons of diesel engines is often associated with formation of cracks originating at the bowl rim. The appearance of cracks is a consequence of thermal fatigue of the material due to low-frequency cycles of heating and cooling of the piston during the engine start-up, operation at various speed and load conditions, and subsequent shutdown. To assess the lifetime of the bowl rim, it is necessary to simulate non-isothermal elastoplastic deformation of the alloy using material plasticity and creep models available in finite element analysis software (e.g. ANSYS). This paper presents the results of uniaxial tensile and creep tests of proportional specimens made from piston blanks of the V-type diesel engines YaMZ-658. The piston material is AlSi12CuNiMg silumin alloy. The article de-

scribes methods for determining constants in plasticity and creep models. The results of numerical simulation of the piston's stress-strain state for the *start — nominal power mode — stop cycle* using the finite element method are presented. Conclusions about the presence of plastic and creep strains at the piston edge are drawn.

**Keywords:** low-cycle fatigue, inelastic deformation, plasticity and creep of material, diesel engine, piston edge

Транспортные дизельные двигатели (далее дизели), в которых максимальное давление сгорания не превышает 20 МПа, обычно оснащены поршнями из алюминийно-кремнистых сплавов (силуминов), отличающихся высокой термостойкостью прочностью [1]. Тем не менее, запас по сопротивляемости этих сплавов термической усталости значительно сокращается вследствие постоянного повышения удельной мощности дизелей, связанного с ужесточением законодательных норм и растущих запросов потребителей.

Одним из показателей, характеризующих тепловую напряженность поршня, является его максимальная температура, которая для данного материала достигает критического уровня (420 °С) [2–4]. Таким образом, для дальнейшего использования силумина в условиях высоких температур и напряжений требуется более точное описание процесса малоциклового термомеханической усталости материала в наиболее нагруженных зонах детали, в первую очередь, на кромке камеры сгорания (КС).

Исследование работоспособности поршней включает в себя анализ температурных полей, напряженно-деформированного состояния (НДС) и расчет на усталость [5, 6].

Цель работы — проведение двух первых этапов исследования с помощью программного пакета конечно-элементного анализа ANSYS для поршня восьмицилиндрового V-образного дизеля ЯМЗ-658.

**Определение констант в моделях пластичности и ползучести материала.** Поршни дизеля ЯМЗ-658 изготавливают методом литья в кокиль из силуминового сплава АК12ММгН. Для изучения механических свойств сплава из заготовок поршней получены пропорциональные цилиндрические образцы.

Испытания на одноосное растяжение образцов проведены на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z100 при температуре  $T = 20, 150$  и  $250$  °С. Скорость деформирования выбрана равной 1 мм/мин. В связи

с тем, что измерения на упругом этапе эксперимента являются грубыми, значения модуля упругости  $E$  были взяты из работы [6]. По полученным кривым растяжения определен предел текучести  $\sigma_T$  материала, после чего построена зависимость добавочного напряжения от пластической деформации, необходимая для нахождения констант в модели пластичности.

Поведение материала в пластической области при непропорциональном нагружении удовлетворительно описывает теория течения в сочетании с энергетическим условием начала пластичности Хубера — Мизеса и кинематическим законом упрочнения [7]:

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

где  $\sigma_{ij}$  — компоненты тензора напряжений;  $s_{ij}$  — девиатор напряжений;  $a_{ij}$  — девиатор добавочного напряжения;  $(s_{ij} - a_{ij})$  — девиатор активного напряжения.

Изотропное упрочнение несвойственно сплавам системы Al-Si-Cu [8].

В качестве закона упрочнения принято эволюционное уравнение, разработанное Армстронгом и Фредериком [9] и позже развитое в работах Шабоша [10],

$$\dot{a}_{ij} = \frac{2}{3}C\dot{\epsilon}_{ij}^p - \gamma a_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}^{p*}, \quad (1)$$

где  $C$  и  $\gamma$  — константы материала;  $\dot{\epsilon}_{ij}^p$  — компоненты тензора скоростей пластической деформации;  $\dot{\epsilon}_{ij}^{p*}$  — скорость накопленной пластической деформации.

В среде ANSYS такую модель называют Chaboche Nonlinear Kinematic Hardening Model [11]. Определить входящие в нее константы  $C$  и  $\gamma$  можно по кривым деформирования образцов.

Выражение (1), записанное для случая одноосного напряженного состояния, после интегрирования принимает вид

$$a = \frac{C}{\gamma}(1 - e^{-\gamma \epsilon^p}). \quad (2)$$

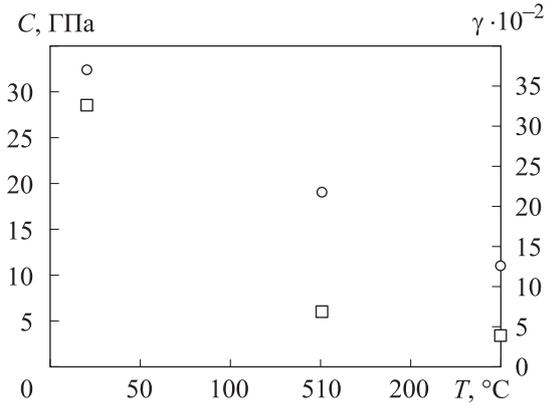


Рис. 1. Зависимость констант  $C$  (○) и  $\gamma$  (□) в модели пластичности от температуры  $T$

Из выражения (2) можно заключить, что величина  $C/\gamma$  равна максимальному добавочному напряжению. При известном значении  $C/\gamma$  константы  $C$  и  $\gamma$  подбираются методом наименьших квадратов (рис. 1).

Для проверки правильности определения констант в среде ANSYS проведены численные

эксперименты, которые показали хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных (рис. 2).

Кривые ползучести сплава получены на испытательной машине ATS серии 2330 при температуре  $T = 260$  и  $280$  °C и напряжениях  $\sigma = 60, 70$  и  $80$  МПа. Испытания при  $T = 300$  °C проведены для напряжений  $\sigma = 60, 65$  и  $70$  МПа.

Развитие деформаций ползучести материала при нестационарных нагрузках хорошо описывает теория упрочнения [12], согласно которой скорость деформации ползучести при данной температуре определяется действующим напряжением и накопленной деформацией ползучести  $\epsilon^c$ :

$$\dot{\epsilon}_i^c = C_1 (\sigma_i)^{C_2} (\epsilon_i^c)^{C_3} e^{-C_4/T}, \quad (3)$$

где  $\epsilon_i^c$  — интенсивность деформации ползучести;  $C_1, \dots, C_4$  — константы;  $\sigma_i$  — интенсивность напряжений.

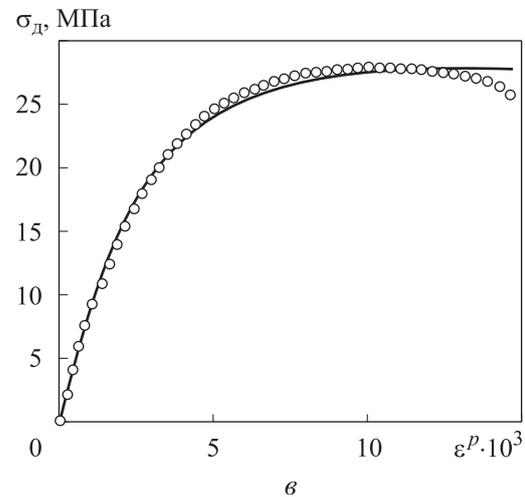
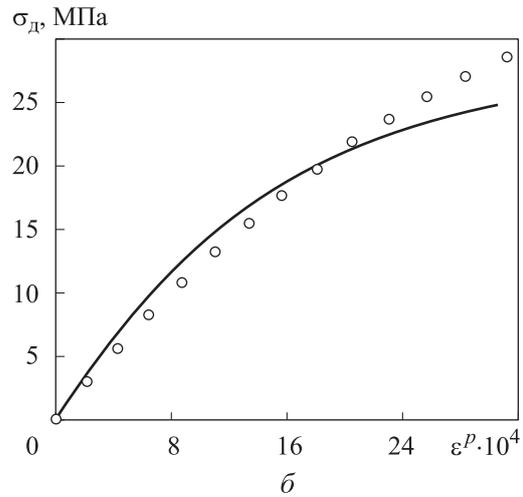
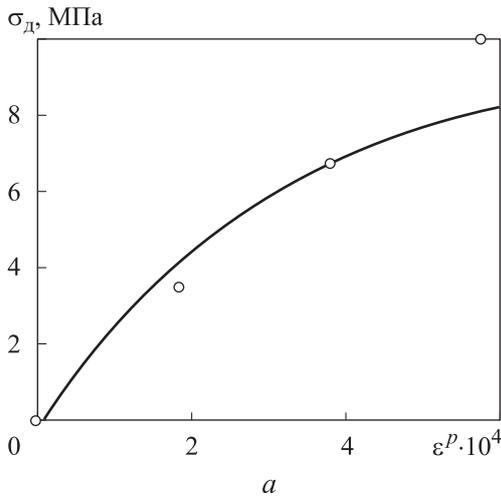


Рис. 2. Экспериментальные (○) и расчетные (—) зависимости добавочного напряжения  $\sigma_d$  от пластической деформации  $\epsilon^p$  при температуре  $T = 20$  (а),  $150$  (б) и  $250$  °C (в)

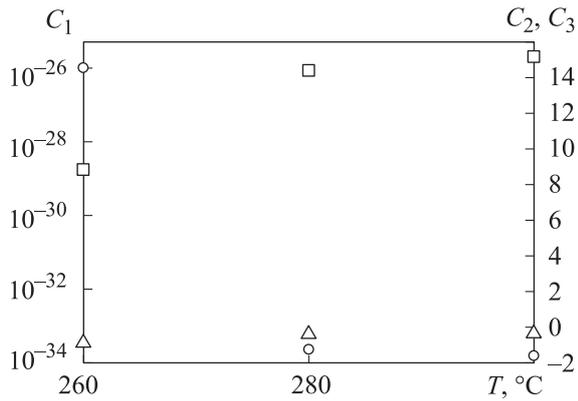


Рис. 3. Зависимость констант  $C_1$  (○),  $C_2$  (□) и  $C_3$  (△) в модели ползучести от температуры  $T$

Эта теория, впервые сформулированная Людвигом и Надаи, в работах Давенпорта получила название Strain Hardening [12, 13] (такое же название использовано в среде ANSYS [11]).

Приняв  $C_4 = 0$  в выражении (3) для исключения температурной зависимости, после разделения переменных и интегрирования имеем

$$\varepsilon^c = [C_1(1-C_3)]^{\frac{1}{1-C_3}} \sigma^{\frac{C_2}{1-C_3}} t^{\frac{1}{1-C_3}}.$$

Наклон кривых ползучести, построенных в логарифмических координатах, дает величину  $1/(1-C_3)$ , откуда определяем среднее для всех кривых значение  $C_3$ . Далее выбираем произвольное значение времени  $t^*$  и строим в логарифмических координатах график зависимости деформации ползучести  $\varepsilon^c$  от напряжения при  $t = t^*$ .

Тангенс угла наклона полученной прямой равен  $C_2/(1-C_3)$ , а отрезок, отсекаемый ею на оси ординат —  $[C_1(1-C_3)t^*]^{1/(1-C_3)}$ . Отсюда определяем константы  $C_2$  и  $C_1$  соответственно. Вычисленные значения коэффициентов в законе ползучести приведены на рис. 3.

Численное моделирование процесса ползучести цилиндрического образца в среде ANSYS показало удовлетворительное согласование с экспериментами (рис. 4). Существенное несоответствие наблюдается лишь при температуре  $T = 280$  °C и напряжении  $\sigma = 70$  МПа; добиться лучшего совпадения результатов можно, приняв  $C_2$  функцией напряжения.

**Расчет теплового и напряженно-деформированного состояния поршня.** Объектом исследования являлся поршень дизеля ЯМЗ-658.

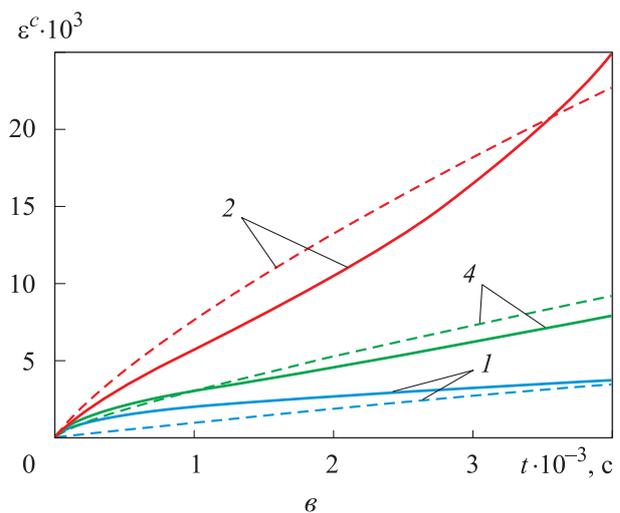
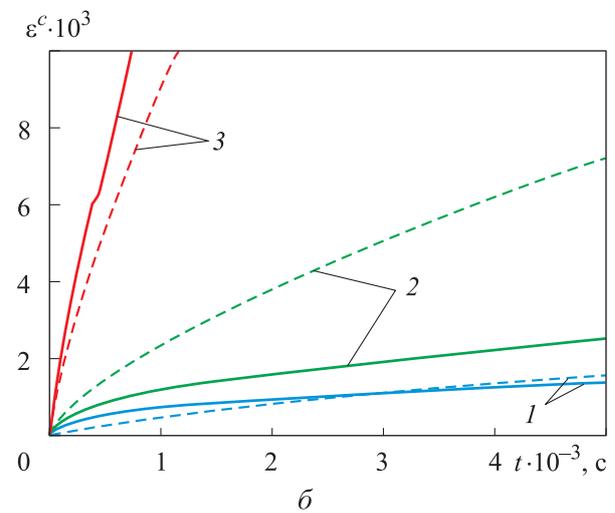
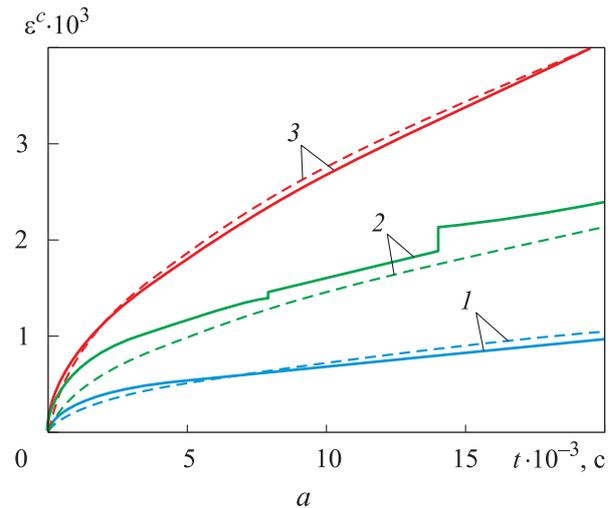


Рис. 4. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (штриховые линии) зависимости деформации ползучести  $\varepsilon^c$  от времени  $t$  при температуре  $T = 260$  (а),  $280$  (б),  $300$  °C (в) и различных значениях напряжения: 1 —  $\sigma = 60$  МПа; 2 —  $\sigma = 70$  МПа; 3 —  $\sigma = 80$  МПа; 4 —  $\sigma = 65$  МПа

**Техническая характеристика дизеля ЯМЗ-658**

Диаметр цилиндра $D$ , мм .....	130
Ход поршня $S$ , мм .....	140
Номинальная мощность $N_e$ , кВт .....	309
Номинальная частота вращения $n$ , мин <sup>-1</sup> .....	1900
Удельный эффективный расход топлива $g_e$ , г/(кВт·ч) .....	195

В программе твердотельного моделирования SolidWorks созданы трехмерные модели поршня, поршневого пальца, шатуна и гильзы цилиндра. Для ограничения количества степеней свободы конечно-элементной модели в расчетную область включена только половина сборки указанных деталей с заданием условий симметрии (рис. 5). Шатун закреплялся по нижней головке, а гильза — по опорному буртику и направляющим поясам. Между деталями задавался тип контакта с трением (Frictional).

Для модели неізотермического упругопластического деформирования материала поршня приняты следующие допущения: материал — однородный и начально изотропный; в процессе упругопластического деформирования в нем может возникать только деформационная анизотропия [14].

Математическая модель включала в себя следующие основные уравнения:

- для полной деформации

$$\epsilon = \epsilon^t + \epsilon^e + \epsilon^p + \epsilon^c;$$

- для температурной деформации

$$\epsilon^t = \alpha_T (T - T_0);$$

- условие текучести

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

- для скорости упругой деформации

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

- закон нелинейного кинематического упрочнения

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

- ассоциированный закон течения

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{3}{2} \frac{s_{ij} - a_{ij}}{\sigma_{ij}^*} \dot{\epsilon}_{ij}^{p*};$$

- для скорости деформации ползучести

$$\dot{\epsilon}_{ij}^c = C_1 \sigma_{ij}^{C_2} (\epsilon_{ij}^c)^{C_3} e^{-C_4/T},$$

где  $\epsilon^e$  — упругая деформация;  $\alpha_T$  — температурный коэффициент линейного расширения;  $T_0$  — начальная температура;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $\sigma_0 = \sigma_{ii}/3$  — среднее напряжение;  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера;  $\sigma_{ij}^*$  — интенсивность активных напряжений.

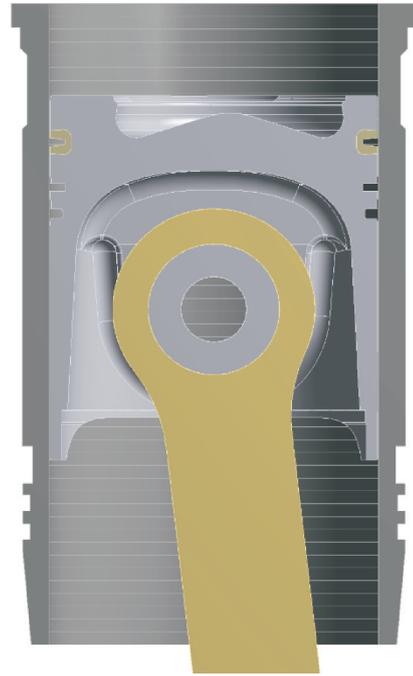


Рис. 5. Твердотельная модель поршня с поршневым пальцем, шатуном и гильзой цилиндра

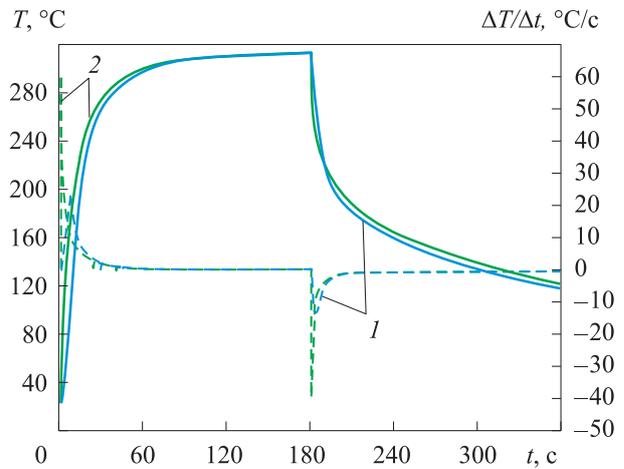


Рис. 6. Зависимость температуры  $T$  (сплошные линии) и скорости ее изменения  $\Delta T/\Delta t$  (штриховые линии) на кромке КС поршня от времени  $t$  при изменении ГУ за 8 (1) и 1 с (2)

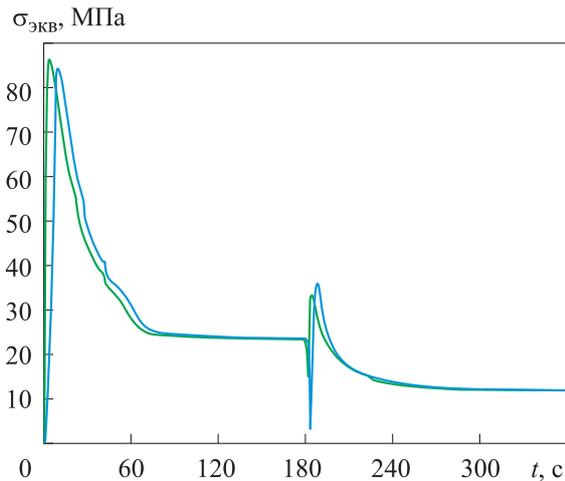


Рис. 7. Зависимость эквивалентных напряжений по Мизесу  $\sigma_{\text{экв}}$  на кромке КС поршня от времени  $t$  при изменении ГУ за 8 (—) и 1 с (—)

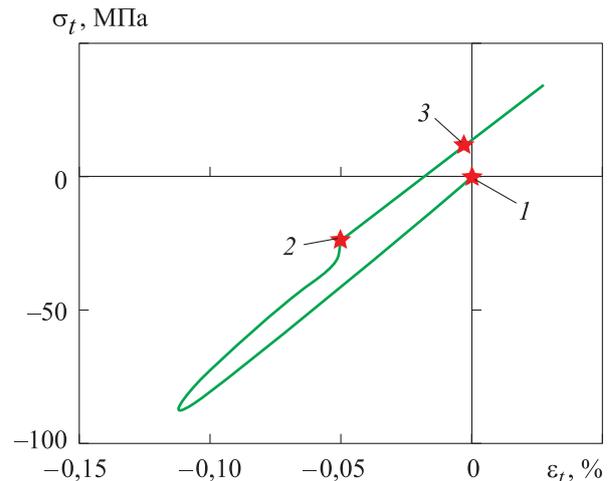


Рис. 8. Кривая деформирования материала поршня на кромке КС:  
 $\sigma_t$  и  $\varepsilon_t$  — окружные напряжения и деформации;  
1 — начало нагрузочного цикла; 2 и 3 — окончание полуциклов нагрева и охлаждения поршня

Нагрузочный цикл состоял из полуцикла нагрева поршня в течение 180 с до температур, соответствующих режиму номинальной мощности, и полуцикла охлаждения (180 с) при граничных условиях (ГУ) свободной конвекции.

Рабочий процесс дизеля рассчитан в программном комплексе ДИЗЕЛЬ-РК, а тепловые ГУ третьего рода — в среде ICE [15] (обе программы разработаны в МГТУ им. Н.Э. Баумана). Исследованы два режима нагружения. В первом режиме время линейного возрастания и убывания ГУ составляло 8 с, во втором — 1 с.

На рис. 6 приведены зависимости температуры и скорости ее изменения на кромке КС поршня от времени. Как показывают расчеты, при смене времени возрастания ГУ с 8 на 1 с скорость нагрева увеличивается от 24 до 60 °С/с.

При этом заброс термических напряжений изменяется незначительно (рис. 7), и в обоих случаях эквивалентные напряжения не превышают предел текучести сплава.

Таким образом, форма кромки КС исключает образование пластических деформаций  $\varepsilon^p$  для данного уровня форсирования дизеля. Однако в поршне активно развиваются дефор-

мации ползучести  $\varepsilon^c$ , вследствие чего происходит релаксация напряжений (рис. 8). Это, в свою очередь, способствует росту остаточных напряжений на кромке.

## Выводы

1. По результатам испытаний на одноосное растяжение и ползучесть цилиндрических образцов силуминового сплава АК12ММгН определены константы, входящие в состав модели пластичности и ползучести материала.

2. Расчет поршня при разных скоростях нагрева позволяет утверждать, что форма кромки КС поршня исключает образование пластических деформаций. Тем не менее деформирование кромки не остается упругим из-за интенсивного протекания процесса ползучести материала, который вызывает релаксацию термических напряжений.

3. Чтобы исследовать кинетику НДС кромки в условиях появления пластических деформаций, в дальнейшем необходимо изучить деформирование поршня при повышенных степенях форсирования дизеля.

## Литература

- [1] KS *Mono-Block Steel Pistons for Commercial Truck Applications*. URL: <https://www.rheinmetall-automotive.com> (дата обращения 25 ноября 2019).
- [2] Baberg A., Freidhager M., Mergler H., Schmidt K. Aspects of Piston Material Choice for Diesel Engines. *MTZ worldwide*, 2012, vol. 73, pp. 26–30, doi: <https://doi.org/10.1007/s38313-012-0249-8>

- [3] Kenningley S., Morgenstern R. Thermal and Mechanical Loading in the Combustion Bowl Region of Light Vehicle Diesel AlSiCuNiMg Pistons; Reviewed with Emphasis on Advanced Finite Element Analysis and Instrumented Engine Testing Techniques. *SAE International*, 2012, no. 2012-01-1330, pp. 1-14, doi: 10.4271/2012-01-1330
- [4] Reichstein S., Konrad P., Kenningley S., Dörnenburg F.T.H. Microstructure Modification Piston Materials for High Stress and Temperature Conditions. *ATZ Autotechnology*, 2008, vol. 8, pp. 42-47.
- [5] Thomas J.J., Verger L., Bignonnet A., Borret S.M. Thermomechanical Design in the Automotive Industry. *SAE Technical Paper*, 2002, no. 2002-01-0659, pp. 1-10, doi: 10.4271/2002-01-0659
- [6] Mahle GmbH. *Pistons and engine testing*. Springer, 2012. 284 p.
- [7] Малинин Н.Н. *Прикладная теория пластичности и ползучести*. Москва, Машиностроение, 1975. 398 с.
- [8] Mao J., Engler-Pinto C., Su X., Kenningley S. Cyclic Behavior of an Al-Si-Cu Alloy under Thermo-Mechanical Loading. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 2014, vol. 7, iss. 3, pp. 1-8, doi: 10.4271/2014-01-1012
- [9] Armstrong P.J., Frederick C.O. A Mathematical Representation of the Multiaxial Bauschinger Effect. *Materials at High Temperatures*, 2007, vol. 24, no. 1, pp. 1-26, doi: 10.3184/096034007X207589
- [10] Chaboche J.L. Constitutive Equations for Cyclic Plasticity and Cyclic Viscoplasticity. *International Journal of Plasticity*, 1989, vol. 5, pp. 247-302, doi: 10.1016/0749-6419(89)90015-6
- [11] *Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications*. Release 12.0. ANSYS Inc., 2009. 1190 p.
- [12] Работнов Ю.Н. *Ползучесть элементов конструкций*. Москва, Наука, 1966. 752 с.
- [13] Manson S.S., Halford G.R. *Fatigue and Durability of Metals at High Temperatures*. Materials Park, Ohio, ASM International, 2009. 278 p.
- [14] Бондарь В.С., Даншин В.В. *Пластичность. Пропорциональные и непропорциональные нагружения*. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2008. 176 с.
- [15] Чайнов Н.Д., Краснокутский А.Н., Мягков Л.Л., Руссинковский С.Ю. *Математическое моделирование полей температур, деформаций и напряжений в деталях цилиндропоршневой группы поршневых двигателей*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 32 с.

## References

- [1] KS *Mono-Block Steel Pistons for Commercial Truck Applications*. Available at: <https://www.rheinmetall-automotive.com> (accessed 25 November 2019).
- [2] Baberg A., Freidhager M., Mergler H., Schmidt K. Aspects of Piston Material Choice for Diesel Engines. *MTZ worldwide*, 2012, vol. 73, pp. 26-30, doi: <https://doi.org/10.1007/s38313-012-0249-8>
- [3] Kenningley S., Morgenstern R. Thermal and Mechanical Loading in the Combustion Bowl Region of Light Vehicle Diesel AlSiCuNiMg Pistons; Reviewed with Emphasis on Advanced Finite Element Analysis and Instrumented Engine Testing Techniques. *SAE International*, 2012, no. 2012-01-1330, pp. 1-14, doi: 10.4271/2012-01-1330
- [4] Reichstein S., Konrad P., Kenningley S., Dörnenburg F.T.H. Microstructure Modification Piston Materials for High Stress and Temperature Conditions. *ATZ Autotechnology*, 2008, vol. 8, pp. 42-47.
- [5] Thomas J.J., Verger L., Bignonnet A., Borret S.M. Thermomechanical Design in the Automotive Industry. *SAE Technical Paper*, 2002, no. 2002-01-0659, pp. 1-10, doi: 10.4271/2002-01-0659
- [6] Mahle GmbH. *Pistons and engine testing*. Springer, 2012. 284 p.
- [7] Malinin N.N. *Priladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti* [Applied Theory of Plasticity and Creep]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1975. 398 p.
- [8] Mao J., Engler-Pinto C., Su X., Kenningley S. Cyclic Behavior of an Al-Si-Cu Alloy under Thermo-Mechanical Loading. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 2014, vol. 7, iss. 3, pp. 1-8, doi: 10.4271/2014-01-1012

- [9] Armstrong P.J., Frederick C.O. A Mathematical Representation of the Multiaxial Bauschinger Effect. *Materials at High Temperatures*, 2007, vol. 24, no. 1, pp. 1–26, doi: 10.3184/096034007X207589
- [10] Chaboche J.L. Constitutive Equations for Cyclic Plasticity and Cyclic Viscoplasticity. *International Journal of Plasticity*, 1989, vol. 5, pp. 247–302, doi: 10.1016/0749-6419(89)90015-6
- [11] *Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications*. Release 12.0. ANSYS Inc., 2009. 1190 p.
- [12] Rabotnov Yu.N. *Polzuchest' elementov konstruksiy* [Creep of structural elements]. Moscow, Nauka publ., 1966. 752 p.
- [13] Manson S.S., Halford G.R. *Fatigue and Durability of Metals at High Temperatures*. Materials Park, Ohio, ASM International, 2009. 278 p.
- [14] Bondar' V.S., Danshin V.V. *Plastichnost'. Proportional'nyye i neproportional'nyye nagruzheniya* [Plastic. Proportional and disproportionate loads]. Moscow, FIZMATLIT publ., 2008. 176 p.
- [15] Chaynov N.D., Krasnokutskiy A.N., Myagkov L.L., Russinkovskiy S.Yu. *Matematicheskoye modelirovaniye poley temperatur, deformatsiy i napryazheniy v detalyakh tsilindroporshnevoy gruppy porshnevykh dvigateley* [Mathematical modeling of temperature, strain and stress fields in the details of a piston-cylinder group of piston engines]. Moscow, Bauman Press, 2003. 32 p.

Статья поступила в редакцию 19.02.2020

## Информация об авторах

**МЯГКОВ Леонид Львович** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Поршневые двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: mll-08@mail.ru).

**СИВАЧЕВ Станислав Максимович** — аспирант кафедры «Поршневые двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: stassivachev@yandex.ru).

## Information about the authors

**MYAGKOV Leonid Lvovich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Piston Engines Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: mll-08@mail.ru).

**SIVACHEV Stanislav Maksimovich** — Postgraduate, Piston Engines Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: stassivachev@yandex.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Мягков Л.Л., Сивачев С.М. Моделирование напряженно-деформированного состояния поршня дизеля с учетом неупругих деформаций. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 8, с. 29–36, doi: 10.18698/0536-1044-2020-8-29-36

### Please cite this article in English as:

Myagkov L.L., Sivachev S.M. Simulation of the Stress-Strain State of Diesel Engine Pistons Taking into Account Inelastic Deformations. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 8, pp. 29–36, doi: 10.18698/0536-1044-2020-8-29-36