

Ползучесть жаропрочного низколегированного чугуна ЧНХМД при изгибе и сдвиге

© Б.В. Букеткин, И.Е. Семенов-Ежов, А.А. Ширшов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

В современных транспортных дизельных двигателях для изготовления высоконагруженных деталей цилиндропоршневой группы, работающих в условиях переменных нагрузок, широко используется жаропрочный низколегированный чугун. Высокие температуры, несмотря на кратковременность их действия, вызывают развитие в таких деталях необратимой деформации ползучести. В результате после остановки двигателя в деталях возникают остаточные растягивающие напряжения. Для расчетного определения уровня остаточных напряжений необходимо иметь уравнение состояния, пригодное для расчетов с учетом ползучести при переменных значениях температуры и напряжений. Проведена проверка адекватности уравнения состояния, полученного по результатам испытаний на растяжение и сжатие, посредством сравнения с теоретическим решением результатов испытаний образцов при чистом изгибе и чистом сдвиге. Подтверждена возможность использования приведенного уравнения состояния для расчетов деталей из жаропрочного низколегированного чугуна в условиях ползучести.

Ключевые слова: жаропрочный чугун, ползучесть при растяжении, ползучесть при сжатии, уравнение состояния

Введение. Высокопрочный чугун марки ЧНХМД, как и другие легированные чугуны, например ЧНХМДШ, ЧНМШ, применяют для изготовления высоконагруженных деталей цилиндропоршневой группы (головка блока цилиндров, поршень) современных форсированных дизелей. Такие детали в течение довольно длительного времени могут работать при температуре до 500 °С и сжимающих напряжениях до 250 МПа. В этих условиях вследствие ползучести металла в деталях развиваются необратимые деформации и после охлаждения возникают остаточные растягивающие напряжения. Для расчетного определения уровня остаточных напряжений необходимо иметь аналитическое описание процесса ползучести. С этой точки зрения довольно простыми и удобными для использования в инженерных расчетах являются так называемые технические теории ползучести.

Уравнение состояния жаропрочного низколегированного чугуна ЧНХМД. В лаборатории кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана на основании испытания образцов из жаропрочного низколегированного чугуна ЧНХМД были получены кривые ползучести при растяжении и сжатии. Для их описания использована теория течения [1, 2], согласно которой интенсивность скоростей деформации ползучести ξ_e^c есть функция температуры,

времени и напряжения, т. е. $\xi_e^c = F_1(T) F_2(t) F_1(\sigma)$. Для описания кривых ползучести было использовано уравнение состояния [3]

$$\varepsilon_e^c = a \left(1 + \frac{b\sigma_0}{\sigma_e} \right) \bar{T}^k \cdot t^m \bar{\sigma}_e^n, \quad (1)$$

где $\varepsilon_e^c = \sqrt{2\varepsilon_{ij}^c \varepsilon_{ij}^c} / 3$ — интенсивность деформаций ползучести; a, b — константы; σ_0 — среднее нормальное напряжение; $\sigma_e = \sqrt{3S_{ij}S_{ij}} / 2$ — интенсивность напряжений, $\bar{\sigma}_e = \sigma_e / 100$; ε_{ij}^c и S_{ij} — компоненты девиатора деформаций ползучести и девиатора напряжений соответственно; $\bar{T} = T/T_0$ — безразмерная абсолютная температура ($T_0 = 273$ К); t — время, ч; k, m, n — постоянные материала.

После обработки результатов испытаний в зависимости от методики обработки были получены уравнения с различными коэффициентами:

$$\varepsilon_e^c = 8,20 \cdot 10^{-14} \cdot (1 \pm 0,089) \left(1 + \frac{2\sigma_0}{\sigma_e} \right) \bar{T}^{21,4} \cdot t^{0,57} \bar{\sigma}_e^{3,6}, \quad (2a)$$

$$\varepsilon_e^c = 13,3 \cdot 10^{-14} \cdot (1 \pm 0,15) \left(1 + \frac{1,86\sigma_0}{\sigma_e} \right) \bar{T}^{21,2} \cdot t^{0,49} \bar{\sigma}_e^{3,3}. \quad (2б)$$

Обе формы уравнения состояния (2) дают одинаковый результат как при растяжении, так и при сжатии. Отметим, что испытания образцов проводили в диапазоне температур 400...500 °С при напряжениях растяжения до 130 МПа и напряжениях сжатия до 190 МПа.

Цель настоящей работы — проверка адекватности уравнения состояния (1): а) путем сравнения теоретического решения задачи о чистом изгибе стержня из материала, характеристики ползучести которого зависят от вида напряженного состояния, с результатами испытаний в условиях чистого изгиба; б) путем сравнения кривых ползучести в условиях чистого сдвига, полученных из уравнений (2а) и (2б), с найденными экспериментально.

Стенд для испытаний при изгибе. Испытания образцов при изгибе и кручении в условиях ползучести проводили на специально изготовленных стендах (рис. 1). Образец 3 представляет собой прямой стержень прямоугольного поперечного сечения высотой 25 мм, шириной 16 мм и длиной 150 мм, закрепленный в захватах 2 из жаропрочной стали, установленных на неподвижных шариковых опорах 1. Образец с захватами помещен в печь 4. Для того чтобы при изгибе центральная часть образца находилась по середине печи, предусмотр-

рена возможность ее перемещения в вертикальном направлении. Нагружение осуществляется через рычажную систему посредством грузов. Для определения кривизны измеряли прогибы в трех равноотстоящих точках ($a = 50$ мм) с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм, вынесенных за пределы печи во избежание их нагрева. Испытания образцов проводили при постоянной температуре 500 ± 5 °С. Было испытано пять образцов при изгибающем моменте 100 Н·м и два образца при изгибающем моменте 121 Н·м. Продолжительность испытаний составляла 140–150 ч.

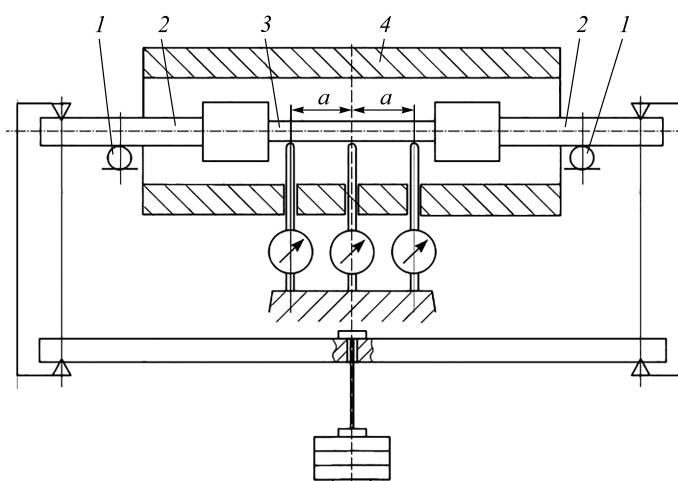


Рис. 1. Схема стэнда для испытания при изгибе в условиях ползучести:
1 — шариковые опоры; 2 — захваты; 3 — стержень; 4 — печь

Решению задачи о чистом изгибе балок в условиях ползучести с учетом различных характеристик материала при растяжении и сжатии посвящены, в частности, работы [4–7]. В этих работах рассмотрены вторая и третья стадии ползучести с учетом повреждаемости при различных видах зависимости минимальной скорости ползучести от напряжений. Для наших целей результаты этих решений не могут быть использованы, поскольку нас интересует начальная, т. е. неустановившаяся, стадия ползучести. В работе [8] рассмотрена задача о ползучести стержня кругового поперечного сечения при кручении.

Аналитическое решение задачи о чистом изгибе в условиях ползучести. Как известно, при чистом изгибе нормальная сила $N = \int \sigma dA = 0$, а изгибающий момент $M_x = \int \sigma y dA$, осевые деформации ϵ пропорциональны кривизне κ и расстоянию от нейтрального слоя y , т. е. $\epsilon = \kappa y$. В процессе ползучести вследствие различия скоростей деформации ползучести при растяжении и сжатии положение нейтрального слоя будет смещаться. Разбиваем процесс по времени

на шаги Δt , принимая в пределах шага Δt скорость деформации постоянной [1] и определяемой напряжениями предыдущего шага. Следовательно, $\Delta \kappa y = \Delta \varepsilon_e + \Delta \varepsilon_c$, причем $\Delta \varepsilon_e = \Delta \sigma / E$ (где E — модуль упругости), а $\Delta \varepsilon_c = \xi_c \Delta t$. Отсюда следует

$$\Delta \sigma = E (\Delta \kappa y - \xi_c \Delta t). \quad (3)$$

Здесь $\xi_c = am(1 + b\sigma_0/\sigma_e) \bar{T}^k \cdot t^{m-1} \bar{\sigma}_e^n$ — скорость деформации ползучести.

Поскольку изгибающий момент постоянен, а нормальная сила равна нулю, их приращения также равны нулю, т. е.

$$\begin{aligned} \Delta N &= \int \Delta \sigma dA = 0, \\ \Delta M_x &= \int \Delta \sigma y dA = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Равенства (3) и (4) позволяют определить положение нейтрального слоя и приращение кривизны $\Delta \kappa$ на шаге Δt .

При чистом изгибе напряженное состояние одноосное, поэтому при растяжении $\sigma_0 = \sigma_z/3$ и $\sigma_e = \sigma_z$, при сжатии $\sigma_0 = -|\sigma_z|/3$ и $\sigma_e = |\sigma_z|$. При постоянной температуре выражение для скорости деформаций можно представить в следующем виде:

$$\xi_c = K \left(1 \pm \frac{b}{3} \right) \cdot t^{m-1} |\bar{\sigma}|^n \text{sign}(\bar{\sigma}), \quad (5)$$

где $K = am\bar{T}^k$.

Для стержня прямоугольного поперечного сечения вследствие того, что скорость ползучести при растяжении выше, чем при сжатии, нейтральный слой будет смещаться в сторону сжатия, т. е. вниз (см. схему нагружения на рис. 1). Обозначим это смещение δh . Известные $\Delta \kappa$ и δh входят в равенства (4), причем δh — в неявном виде. Будем определять их итерационным методом. Задаем значение δh (где h — высота образца) в цикле от 0 до, например, $h/4$ с малым шагом и, используя первое из равенств (4), определяем $\Delta \kappa$ из уравнения

$$\Delta \kappa \cdot \delta h = K \left(1 \pm \frac{b}{3} \right) \cdot t^{m-1} \Delta t \int_0^h |\bar{\sigma}|^n \text{sign}(\bar{\sigma})(y + \delta h) dy. \quad (6)$$

Затем по формуле (3) находим приращение напряжений с учетом смещения нейтрального слоя:

$$\Delta \sigma = E [\Delta \kappa (y + \delta h) - K \left(1 \pm \frac{b}{3} \right) \cdot t^{m-1} |\bar{\sigma}|^n \text{sign}(\bar{\sigma}) \Delta t]$$

и вычисляем приращение изгибающего момента $\Delta M_x = \int_h \Delta \sigma y dy$. Цикл продолжаем до смены знака ΔM_x . Для вычисления интегралов разбиваем сечение на k слоев и вычисляем для каждого слоя произведение $K \left(1 \pm \frac{b}{3}\right) \cdot t^{m-1} |\bar{\sigma}|^n \text{sign}(\bar{\sigma}) y$ по значениям напряжений на предыдущем шаге. На первом шаге $t = 0$, поэтому вместо произведения $t^{m-1} \Delta t$ берем Δt^m [1].

Результаты расчета, проведенного в комплексе MATLAB academic при значениях всех констант согласно уравнению состояния (1) представлены на рис. 2, 3, 5, 6.

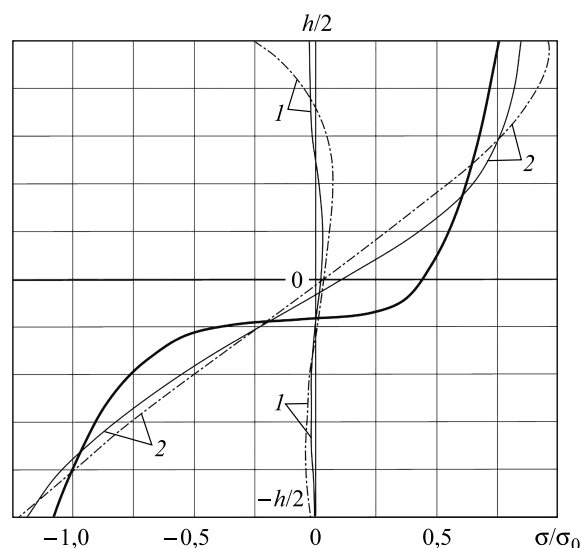


Рис. 2. Распределение напряжений по поперечному сечению в различные моменты времени:

1 — эпюры приращений напряжений за шаг интегрирования; 2 — эпюры напряжений; *штрихпунктирные линии* — эпюра приращений напряжений за первый шаг и эпюра напряжений после первого шага; *сплошные тонкие линии* — эпюра приращений напряжений за шестой шаг и эпюра напряжений после шестого шага; *сплошная жирная линия* — распределение напряжений в условиях установившейся ползучести (последний шаг)

Первый шаг принят равным 0,04 ч, продолжительность последующих 12 шагов возрастала в геометрической прогрессии с множителем 1,5, т. е. $\Delta t_6 = 0,1$ ч; $t_6 = 0,3$ ч. Начиная с 13-го шага приращение времени было постоянным и равным 2 ч. Величина первого шага существенно влияет на сходимость процесса вычислений. Исходное распределение напряжений сказывается только на первых 10–15 шагах, поэтому за исходное распределение напряжений было принято

линейное, описываемое элементарной теорией изгиба стержней:
 $\bar{\sigma} = 2\bar{\sigma}_{\max} y/h$.

На рис. 3 для сравнения приведены экспериментальные и теоретические зависимости кривизны от времени при изгибе образцов. Характерно, что различие между результатами опытов и расчетом возрастает со временем. Это, по-видимому, является следствием несовершенства испытательного стенда. В результате изгиба образца происходит проскальзывание захватов и возникают силы трения, что вызывает непостоянство изгибающего момента по длине образца и появление нормальной силы.

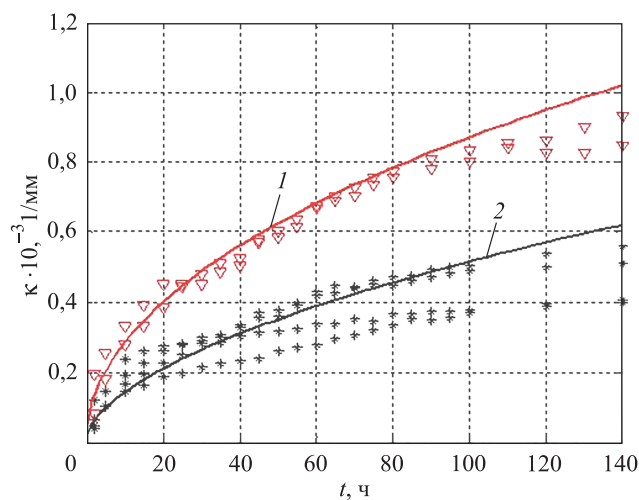


Рис. 3. Сравнение экспериментальных (дискретные точки) и теоретических (сплошные линии) зависимостей кривизны от времени при изгибе образцов:

1 — $\delta_e = 145$ МПа; 2 — $\delta_e = 120$ МПа

Отметим, что обе формы уравнения состояния (2) привели, как и следовало ожидать, к одинаковым расчетным кривым, поскольку при изгибе, как и при испытаниях образцов, имеет место одноосное напряженное состояние. В этой связи с точки зрения предпочтительности использования для расчетов уравнений (2а) и (2б) интерес представляет сравнение с результатами испытаний на кручение.

Испытания на кручение. Эти испытания проводили на тонкостенных трубчатых образцах, т. е. снимали кривые простого последовательного действия в координатах $\gamma - \tau$. На схеме специального испытательного стенда (рис. 4) образец 2 — тонкостенная трубка, имеющая средний диаметр 20,9 мм и толщину стенки 0,9 мм, — закреплен в захватах 1 из жаропрочной стали, установленных на неподвижных шариковых опорах 3. Образец с захватами помещен в печь (на схеме не показана). Нагружение осуществляется посредством прикрепленных к кру-

говым секторам грузов, жестко скрепленных с захватами 1, для сохранения постоянства крутящего момента. Чтобы определить деформацию сдвига, измеряли взаимный угол поворота двух сечений, отстоящих на расстояние $l = 100$ мм. Принцип измерения углов поворота сечений (посредством индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм и рычажной системы 4) понятен из схемы на рис. 4.

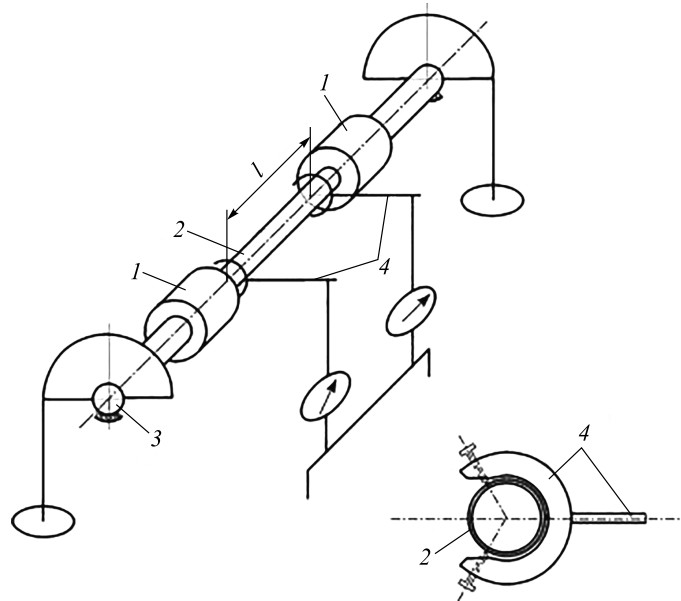


Рис. 4. Схема стэнда для испытаний на кручение в условиях ползучести:

1 — захваты; 2 — образец; 3 — опора; 4 — рычажная система

Испытания образцов проводили при постоянной температуре. Было испытано четыре образца при трех значениях интенсивности напряжений σ_{ei} и температуре 500 °С и три образца при температуре 450 °С. Продолжительность испытаний составляла 100 ч при $\sigma_e = 124$ МПа, 200 ч при $\sigma_e = 130$ МПа, 300 ч при $\sigma_e = 140$ МПа и температуре 500 °С, а также 300 ч при температуре 450 °С.

При чистом сдвиге $\sigma_0 = 0$ и формы (2а), (2б) уравнения состояния (2) примут вид

$$\varepsilon_e^c = 8,20 \cdot 10^{-14} \cdot (1 \pm 0,089) \bar{T}^{21,4} \cdot t^{0,57} \bar{\sigma}_e^{3,6}, \quad (7a)$$

$$\varepsilon_e^c = 13,3 \cdot 10^{-14} \cdot (1 \pm 0,15) \bar{T}^{21,2} \cdot t^{0,49} \bar{\sigma}_e^{3,3}. \quad (7б)$$

В качестве примера на рис. 5 приведены графики расчетной зависимости деформаций сдвига от времени, полученные по уравнениям (7а) и (7б), и результаты испытаний двух образцов при одинаковых значениях интенсивности напряжений $\sigma_e = 130$ МПа и температуре 500 °С.

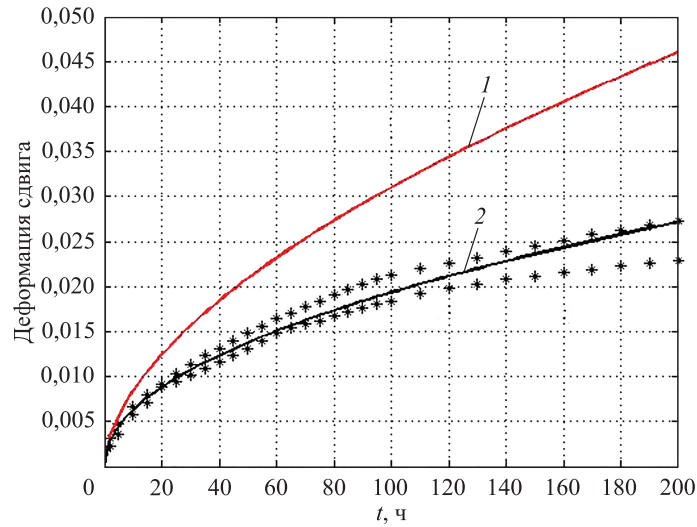


Рис. 5. Графики расчетной зависимости деформаций сдвига от времени, полученные по уравнениям (7а) и (7б) (сплошные кривые 1 и 2 соответственно) и экспериментальные значения (дискретные точки); $\delta_e = 130$ МПа; $T = 500$ °С

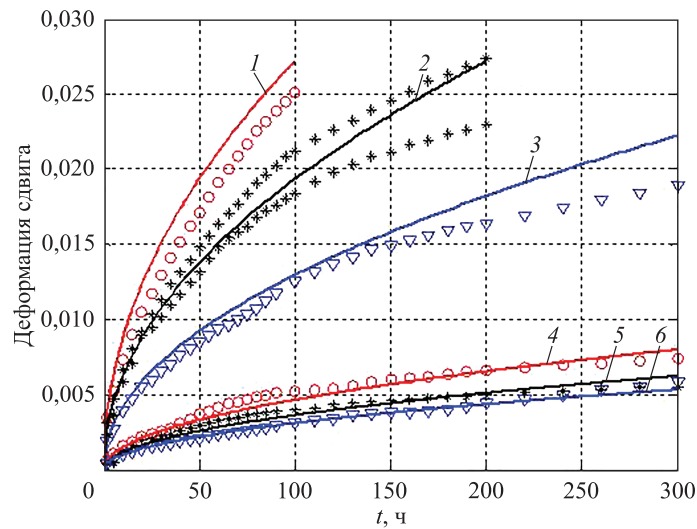


Рис. 6. Результаты испытаний образцов на кручение (дискретные точки) и полученные расчетом по уравнению состояния в форме (7б) (сплошные линии):
 1, 2, 3 — $T = 500$ °С; 4, 5, 6 — $T = 450$ °С; 1, 4 — $\sigma_e = 140$ МПа; 2, 5 — $\sigma_e = 130$ МПа; 3, 6 — $\sigma_e = 120$ МПа

На рис. 5 видно, что уравнение состояния в форме (7б), или (2б), более точно согласуется с опытными данными. Аналогичный результат получен и при других значениях напряжений.

Для сопоставления на рис. 6 приведены результаты испытаний всех образцов и расчетные кривые, полученные по уравнению состояния в форме (7б).

Сравнение расчетных кривых с экспериментальными значениями показало удовлетворительное согласование расчета и эксперимента для уравнения состояния в форме (7б).

Выводы. 1. Уравнение состояния (2) удовлетворительно описывает реологическое поведение чугуна ЧНХМД при изгибе (одноосное напряженное состояние).

2. При двухосном напряженном состоянии (на примере чистого сдвига) уравнение состояния в форме (2б) лучше, чем уравнение состояния в форме (2а), описывает реологическое поведение чугуна ЧНХМД.

3. Для расчетов деталей из жаропрочного низколегированного чугуна ЧНХМД при повышенных температурах для учета деформаций ползучести можно рекомендовать уравнение состояния (1) $\varepsilon_e^c = a (1 + b \sigma_0 / \sigma_e) \bar{T}^k \cdot t^m \bar{\sigma}_e^n$ в форме (2б).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Работнов Ю.Н. *Ползучесть элементов конструкций*. Издание второе, стереотипное. Москва, Наука, 2014, 712 с.
- [2] Хажинский Г.М. *Модели деформирования и разрушения металлов*. Москва, Научный мир, 2011, 231 с.
- [3] Букеткин Б.В., Ширшов А.А. Ползучесть жаропрочного чугуна ЧНХМД при растяжении и сжатии. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2015, т. 81, № 4, с. 56–58.
- [4] Захарова Т.Э. Описание процесса ползучести и разрушения при изгибе балок. *Вестник СибГУТИ*, 2008, № 2, с. 41–44.
- [5] Локощенко А.М., Агахи К.А., Фомин Л.В. Чистый изгиб балки в условиях ползучести из разносопротивляющегося материала. *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физико-математические науки*, 2012, № 1 (26), с. 66–73.
- [6] Кузнецов Е.Б., Леонов С.С. Чистый изгиб балки из разномодульного материала в условиях ползучести. *Вестник Южно-уральского государственного университета. Сер. Математическое моделирование и программирование*, 2013, т. 6, № 4, с. 26–38.
- [7] Nazarov V.V. Determination of creep properties under tension and torsion of copper tubular specimens. *Inorganic Materials*, 2014, vol. 50, no. 15, pp. 1514–1515.
- [8] Banshchikova I.A., Petrov D.M., Tselodub I.Y. Torsion of circular rods at anisotropic creep. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 722, no. 1, 012004.

Статья поступила в редакцию 22.06.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Букеткин Б.В., Семенов-Ежов И.Е., Ширшов А.А. Ползучесть жаропрочного низколегированного чугуна ЧНХМД при изгибе и сдвиге. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 12. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-12-1829>

Букеткин Борис Васильевич — ст. преподаватель кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сфера научных интересов — экспериментальное исследование материалов и конструкций. Автор 30 научных работ.

Семенов-Ежов Игорь Евгеньевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сфера научных интересов — экспериментальные методы. Автор более 100 научных статей.
e-mail: semenovezhov@mail.ru

Шишов Анатолий Артемович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сфера научных интересов — расчеты в пределах и за пределами упругости. Автор более 100 научных работ.
e-mail: chirchovaa@mail.ru

Creep of heat-resistant low-alloy cast iron during bending and sheering

© B.V. Buketkin, I.E. Semenov-Yezhov, A.A. Shirshov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Heat-resistant low-alloy cast iron is widely used in modern transport diesel engines to produce heavy loaded cylinder-piston group parts operating under variable load conditions. Despite their short duration, high temperatures cause development of irreversible creeping deformation in such details. As a result, when the engine stops these details suffer from residual tensile stress. To calculate the level of residual stress, it is necessary to have a conditional equation suitable for calculations which take creep at variable temperatures and voltages into account. Applying a theoretical solution, we examined the adequacy of a conditional equation received from tension and compression test results by comparing the results of the specimen tests with pure bending and pure sheering. The possibility of using a conditional equation to conduct calculations for details from heat-resistant cast iron in creep conditions is confirmed.

Keywords: *heat-resistant cast iron, creep in tension, creep in compression, conditional equation*

REFERENCES

- [1] Rabotnov Yu.N. *Polzuchest elementov konstruksiy* [Creep of structural elements]. 2nd ed., stereotyp. Moscow, Nauka Publ., 2014, 712 p.
- [2] Khazhinskiy G.M. *Modeli deformirovaniya i razrusheniya metallov* [Models of deformation and fracture of metals]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2011, 231 p.
- [3] Buketkin B.V., Shirshov A.A. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov — Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2015, vol. 81, no. 4, pp. 56–58.
- [4] Zakharova T.E. *Vestnik SibGUTI — The Herald of SibSUTIS*, 2008, no. 2, pp. 41–44.
- [5] Lokoschenko A.M., Agakhi K.A., Fomin L.V. *Vestnik samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki — Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*, 2012, no. 1 (26), pp. 66–73.
- [6] Kuznetsov E. B., Leonov S. S. *Vestnik yuzhno-uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye — Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software*, 2013, vol. 6, no. 4, pp. 26–38.
- [7] Nazarov V.V. *Neorganicheskie Materialy — Inorganic Materials*, 2014, vol. 50, no. 15, pp. 1514–1515.
- [8] Banshchikova I.A., Petrov D.M., Tsvlodub I.Y. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 722, no. 1, p. 012004.

Buketkin B.V., Assist. Professor, Department of Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: experimental study of materials and structures. Author of 30 scientific works.

Semenov-Yezhov I.E., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: experimental methods. Author of over 100 scientific papers. e-mail: semenovezhov@mail.ru

Shirshov A.A., Cand. Sc., Assoc. Professor, Department of Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: calculations within and outside elasticity limits. Author of over 100 scientific papers. e-mail: chirchovaa@mail.ru