

УДК 620.172:539.376

## ПОЛЗУЧЕСТЬ ЖАРОПРОЧНОГО ЧУГУНА ЧНХМД ПРИ РАСТЯЖЕНИИ И СЖАТИИ

© Б. В. Букеткин, А. А. Ширшов<sup>1</sup>*Статья поступила 14 марта 2014 г.*

Детали цилиндропоршневой группы дизельных двигателей изготавливают из высокопрочного жаропрочного чугуна. Высокие температуры вызывают развитие необратимых деформаций ползучести металла, в результате чего после остановки двигателя возникают остаточные растягивающие напряжения. Для расчетного определения уровня остаточных напряжений необходимо иметь сведения о ползучести жаропрочного чугуна, которые могут быть получены экспериментально. С этой целью на основании испытаний образцов при растяжении и сжатии в условиях ползучести получена аналитическая зависимость (уравнение состояния), описывающая первую и вторую стадии ползучести, применимая для расчетов при переменных напряжениях и температуре. Предложенное уравнение состояния может быть использовано при проведении расчетов деталей из жаропрочного чугуна марки ЧНХМД в условиях ползучести при температурах до 500 °С.

**Ключевые слова:** жаропрочный чугун; ползучесть при растяжении; ползучесть при сжатии; уравнение состояния.

Для изготовления высоконагруженных деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) современных форсированных дизелей широко используется высокопрочный чугун, легированный хромом, никелем, молибденом, медью, например, марок ЧНХМД, ЧНХМДШ, ЧНМШ. Детали ЦПГ (головка блока цилиндров, поршень) могут сравнительно длительное время находиться в условиях высоких температур (до 500 °С) и сжимающих напряжений (до 250 МПа). При таких условиях вследствие ползучести металла развиваются необратимые деформации, в результате чего после остановки двигателя возникают остаточные растягивающие напряжения. Для расчетного определения уровня остаточных напряжений необходимо иметь аналитические зависимости необратимых деформаций от температуры и напряжений.

Цель данной работы — получение аналитической зависимости для описания первой и второй стадий ползучести, применимой для расчетов при переменных напряжениях и температуре. Известно [1], что при высоких температурах в чугунах возникают деформации ползучести, а также происходит рост зерен графита, который также сопровождается необратимой объемной деформацией. Скорость ползучести чугунов сильно зависит от вида напряженного состояния. Например, при одинаковых условиях (температуре, напряжении и времени) деформации ползучести при растяжении в несколько раз превышают деформации при сжатии [2]. Опубликованных данных о ползучести чугунов сравнительно мало, в основном они

касаются минимальной скорости ползучести [3, 4] при растяжении.

Для выполнения поставленной задачи были проведены испытания стандартных образцов на растяжение и сжатие на испытательной машине АИМА5-2 (максимальная растягивающая нагрузка 30 кН). Нагружение осуществляли вручную посредством подвеса грузов к рычажной системе (отношение плеч рычага 100:1). Удлинение образцов измеряли механическими экстензометрами с ценой деления 0,001 мм, установленными на резьбовые головки образцов. База измерения деформации растягиваемых образцов составляла 100 мм, а сжимаемых — 30 мм. Испытания на сжатие проводили в специально сконструированном приспособлении — реверсоре. Перед испытаниями определяли химический состав чугуна, из которого были изготовлены образцы. Результаты анализа следующие, % масс.: 3,00 С; 1,98 Si; 1,00 Mn; 0,041 P; 0,026 S; 0,23 Cr; 0,90 Ni; 0,21 Mo; 0,27 Cu. Химический состав соответствует чугуну марки ЧНХМД (ГОСТ 7769–82).

Во время предварительных испытаний образцов на растяжение установлено, что при напряжении 183 МПа и температуре 400 °С, а также при напряжении 145 МПа и температуре 500 °С имеет место интенсивное нарастание деформаций за сравнительно короткий промежуток времени (12–15 ч), т.е. такие режимы не представляют практического интереса. Поскольку чугун имеет более высокий предел прочности при сжатии, чем при растяжении, испытания на сжатие проводили при больших напряжениях — от 120 до 183 МПа. В таблице приведены режимы испы-

<sup>1</sup> МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия;  
e-mail: chirchovaa@mail.ru

таний (напряжения  $\sigma$  и температуры  $T$ ), а также количество испытанных образцов на каждом режиме.

При описании процесса ползучести сплава не будем разделять деформации, вызванные ростом зерна и ползучестью, и используем уравнение состояния нелинейно-вязкого тела в соответствии с моделью [5]

$$\varepsilon_e^c = K f_1(\bar{T}) f_2(\bar{t}) \bar{\sigma}_e^n, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_e^c = \sqrt{2\varepsilon_{ij}^c \varepsilon_{ij}^c} / 3$  — интенсивность деформаций ползучести;  $\sigma_e = \sqrt{3S_{ij} S_{ij}} / 2$  — интенсивность напряжений;  $\varepsilon_{ij}^c$  и  $S_{ij}$  — компоненты девиатора деформаций ползучести и девиатора напряжений соответственно;

$$K = A(1 + b\sigma_0/\sigma_e) — \quad (2)$$

функция, зависящая от вида напряженного состояния;  $A$  и  $b$  — постоянные материала;  $\sigma_0$  — среднее нормальное напряжение;  $\bar{T} = T/T_0$  и  $\bar{t} = t/t_0$  — безразмерные абсолютная температура и время соответственно;  $\bar{\sigma}_e = \sigma_e/\sigma_*$ ;  $T_0$  (К),  $t_0$  (ч) и  $\sigma_*$  (МПа) — произвольно выбираемые числа.

Для определения констант в уравнении (1) обрабатывали результаты испытаний на растяжение. В этом случае функция  $K$  — константа. Обработку результатов проводили с использованием комплекса MATLAB.

Принимали следующие значения параметров:  $T_0 = 273$  К;  $t_0 = 1$  ч;  $\sigma_* = 100$  МПа. Сначала подбирали функцию  $f_2$ , потом — коэффициент  $n$ , а затем — функцию  $f_1$ .

При постоянных температуре и напряжении деформацию ползучести можно представить в виде  $\varepsilon^c = A(t/t_0)^p$ . В логарифмических координатах имеем уравнение прямой  $y = px + b$ , где  $y = \log(\varepsilon^c)$ , а  $x = \log(t/t_0)$ . Объединив кривые простого последействия при одинаковых напряжениях, получаем пять множеств точек, каждое из которых соответствует одному из режимов испытаний. Используя линейную регрессию, определяем для каждого множества угловой коэффициент  $p$ . Вследствие разброса экспериментальных данных находим среднее значение коэффициента  $p = 0,55$ .

Коэффициент  $n$  определяем по 12 опытам при постоянной температуре 500 °С и различных напряжениях  $\sigma_k$  (см. таблицу). Преобразуем уравнение (1) к виду

$$y_{ik} = \varepsilon_i^c (t_0/t_i)^p = B(\sigma_{ik}/\sigma_*)^n.$$

Линейная регрессия в логарифмических координатах дает среднее значение коэффициента  $n = 3,6$ .

Для описания зависимости деформации ползучести от температуры выбрана степенная функция  $K\bar{T}^m$ , наиболее точно описывающая полученные кривые простого последействия в диапазоне температур от 400 до 500 °С по сравнению с часто применяемой экспоненциальной [5, 6] зависимостью вида

$\exp(-h/T)$ . Для определения коэффициентов  $K$  и  $m$  уравнение (1) преобразовали к виду

$$y_{ijk} = \varepsilon_{ijk}^c \left( \frac{t_0}{t_{ijk}} \right)^p \left( \frac{\sigma_{jk}}{\sigma_*} \right)^{-n} = K\bar{T}_{jk}^m.$$

Линейная регрессия в логарифмических координатах по всему множеству точек дает среднее значение коэффициента  $m = 21,4$ . При данном фиксированном  $m$  среднее значение коэффициента  $K = 13,7 \cdot 10^{-12}$ .

Испытания при одноосном сжатии были проведены при одной температуре — 500 °С. По аналогии с результатами испытаний на растяжение были определены коэффициенты  $p = 0,58$  и  $n = 3,5$ . С учетом разброса экспериментальных данных можно считать, что они не зависят от вида напряженного состояния. При  $m = 21,4$  среднее значение коэффициента  $K = 2,7 \cdot 10^{-12}$ . По коэффициенту  $K$ , полученному для растяжения, с незначительным округлением приняли в уравнении (2) коэффициент  $b = 2$ .

Для уточнения коэффициента  $A$  и его среднеквадратического отклонения (СКО)  $S_a$  все экспериментальные значения деформаций ползучести были пересчитаны по формуле

$$y_{ijk} = \varepsilon_{ijk}^c \left( \frac{t_0}{t_{ijk}} \right)^p \left( \frac{\sigma_{ejk}}{\sigma_*} \right)^{-n} \frac{\bar{T}_{jk}^m}{1 + 2\sigma_{0jk}/\sigma_{ejk}},$$

где  $i$  — номер измерения деформации при температуре  $T_j$  и напряжении  $\sigma_k$ . При вычислениях варьировали коэффициент  $p$  от 0,55 до 0,58 с шагом 0,01 при двух значениях коэффициента  $n$ , равных 3,5 и 3,6. Исходя из минимума СКО по всему множеству точек были определены коэффициент  $A = 8,2 \cdot 10^{-12}$  и его СКО  $S_a = 8,9 \cdot 10^{-14}$ . Окончательные значения коэффициентов  $p = 0,57$  и  $n = 3,6$ . В итоге уравнение состояния (1) приняло вид

$$\varepsilon_e^c = 8,2 \cdot 10^{-12} (1 \pm 0,089) \left( 1 + \frac{2\sigma_0}{\sigma_e} \right) \bar{T}^{21,4} t^{0,57} \left( \frac{\sigma_e}{100} \right)^{3,6}. \quad (3)$$

Коэффициенты  $p$  и  $n$  определены с двумя значащими цифрами из-за разброса экспериментальных данных и малого влияния их изменения на единицу во втором знаке на СКО. Коэффициент  $m$  найден с тремя

Режимы испытаний и количество испытанных образцов

$\sigma$ , МПа	Растяжение при температурах, °С			Сжатие при температурах, °С
	400	450	500	500
69			4	
94			3	
120	3	3	5	2
145				2
183				2

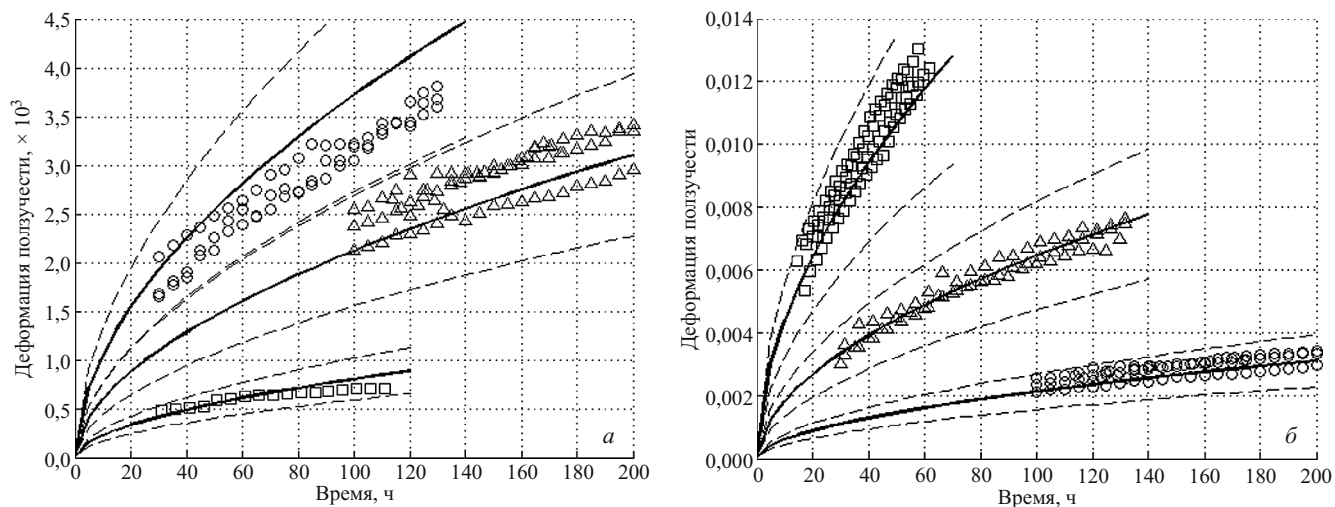


Рис. 1. Результаты испытания образцов на растяжение: а —  $\sigma$  (МПа) и  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) равны 120 и 400 ( $\square$ ), 120 и 450 ( $\triangle$ ), 94 и 500 ( $\circ$ ); б —  $\sigma$  равно 120 МПа ( $\square$ ), 94 МПа ( $\triangle$ ),  $\sigma = 69$  МПа и  $T = 500$   $^{\circ}\text{C}$  ( $\circ$ )

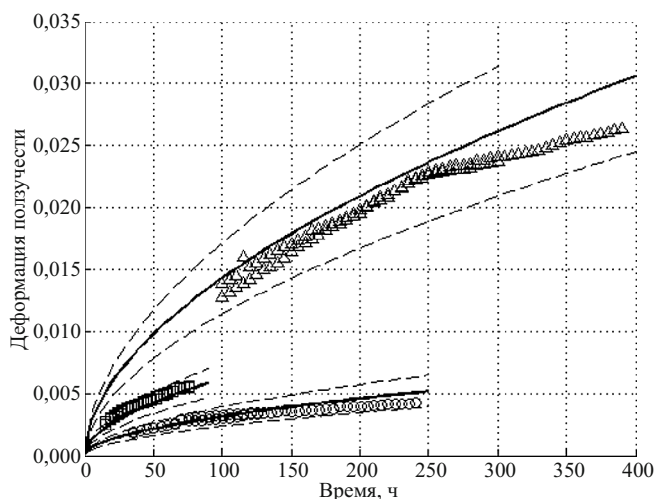


Рис. 2. Результаты испытания образцов на сжатие:  $\circ$  —  $\sigma = 120$  МПа;  $\square$  —  $\sigma = 145$  МПа;  $\triangle$  —  $\sigma = 183$  МПа,  $T = 500$   $^{\circ}\text{C}$

значащими цифрами, так как его изменение на единицу даже в третьем знаке существенно влияет на СКО.

На рис. 1 представлены результаты испытаний образцов на ползучесть при растяжении, а на рис. 2 — при сжатии. Результаты измерений представлены значками, жирные линии построены по уравнению (3), а штриховые показывают возможную область разброса с достоверностью  $\pm 3S_a$ .

Таким образом, полученное уравнение состояния удовлетворительно описывает реологическое пове-

дение чугуна ЧНХМД в диапазоне температур от 400 до 500  $^{\circ}\text{C}$  при напряжениях растяжения до 130 МПа и сжатия до 190 МПа. При температурах ниже 400  $^{\circ}\text{C}$  и напряжениях ниже 60 МПа явление ползучести для режимов работы до 400 ч можно не учитывать.

Предложенное уравнение состояния можно рекомендовать для проведения расчетов деталей ЦПГ в условиях ползучести с указанными выше ограничениями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Davis P. W., Finner T. C., Wilshire B. A comparison of tensile and compressive creep rates / J. Inst. Metals. 1962. Vol. 90. N 9. P. 368 – 377.
2. Carlson R. L., Bodine E. G. An experimental study of compressive — creep behavior at elevated temperatures / Proceedings of ASTM. 1957. Vol. 57. P. 898 – 905.
3. Машиностроение: энциклопедия. Т. II-2. Стали. Чугуны. — М.: Машиностроение, 2004. — 832 с.
4. Shingledecker J. P., Maziasz P. J., Evans N. D., Michael J. Pollard Creep behavior of a new cast austenitic alloy / Int. J. Press. Vessels Piping. 2007. Vol. 84. Issues 1 – 2. January – February. P. 21 – 28.
5. Соснин О. В., Горев Б. В., Никитенко А. Ф. Энергетический вариант теории ползучести. — Новосибирск: Институт гидродинамики СО АН СССР. 1986. — 95 с.
6. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. — М.: Машиностроение, 1975. — 399 с.
7. Хажинский Г. М. Модели деформирования и разрушения металлов. — М.: Научный мир, 2011. — 231 с.