

УДК 620.178.3

С. А. ТЮРИН, кандидат технических наук, ПО «Гомсельмаш», г. Гомель, Е. С. ТАРАНОВА, аспирантка, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

### ВЫСОКОРЕСУРСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЧУГУНА МАРКИ ВЧТГ НА КОНТАКТНУЮ И МЕХАНИЧЕСКУЮ УСТАЛОСТЬ

Для оценки усталостной долговечности машиностроительных материалов при контактном нагружении и изгибе (применительно к таким ответственным объектам, как железнодорожные рельсы, зубчатые колеса и т. п.) исследования необходимо выполнять в высокоресурсной области. В этой связи впервые проведены испытания чугуна с шаровидным графитом марки ВЧТГ на механическую и контактную усталость на базе  $10^8$  циклов; на основе полученных результатов построены кривые контактной и механической усталости, определены основные характеристики сопротивления материала данным видам усталости. Полученные результаты использованы при разработке стандарта предприятия ПО «Гомсельмаш», посвященного определению основных механических свойств высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.

Ученными ООО «НПО Трибофатика» в сотрудничестве со специалистами ПО «Гомсельмаш» несколько лет назад разработан высокопрочный чугун с шаровидным графитом марки ВЧТГ (патент ВУ 15617 СІ 2010.04.30), который может быть использован для ответственных изделий, обычно изготавливаемых из сталей: железнодорожных рельсов, крупногабаритных зубчатых колес, ножей режущих барабанов и других [1–3]. Как правило, определение характеристик сопротивления контактной и механической усталости материалов проводят в многоциклового области, используя критерии усталостного и контактного разрушения [4–6]. Учитывая высокий эксплуатационный ресурс изделий из рассматриваемого материала, который составляет около  $10^8$  циклов, требуется проведение испытаний в высокоресурсной области. Целью представленной работы стало построение кривых контактной и механической усталости высокопрочного чугуна марки ВЧТГ при использовании небольшого количества образцов.

Кривая механической усталости представляет собой зависимость между амплитудой напряжений цикла ( $\sigma_a$ ) и количеством циклов ( $N_\sigma$ ) до достижения предельного состояния испытываемого образца и является наиболее полной интегральной характеристикой свойств сопротивления усталости. Из нее определяют: предел выносливости ( $\sigma_{-1}$ ), абсциссу точки перелома кривой ( $N_{G\sigma}$ ) и показатель наклона левой ветви кривой усталости ( $m_\sigma$ ) [7].

Для построения указанной кривой проведена серия испытаний ряда образцов из чугуна ВЧТГ, механические характеристики которого после термообработки (температура аустенитизации  $T_{ауст} = 930$  °С, температура изотермической выдержки  $T_{из.выд} = 270$  °С) составляли: предел прочности  $\sigma_b = 1390$  МПа; относительное удлинение  $\delta = 1,8$  %; твердость  $47$  HRC; ударная вязкость  $KCU = 7,5$  Дж/см<sup>2</sup>. Схема нагружения – консольный изгиб с вращением образца круглого сечения (рисунок 1) при частоте  $3000$  мин<sup>-1</sup>. Испытания были проведены на шести образцах непрерывно до достижения предельного состояния (разделения образца на две части) или до базового числа циклов  $N_b = 10^8$  на машине для износоусталостных испытаний СИ-03М (ГОСТ 30755–2001) [8]. Полученные результаты представлены в таблице 1.

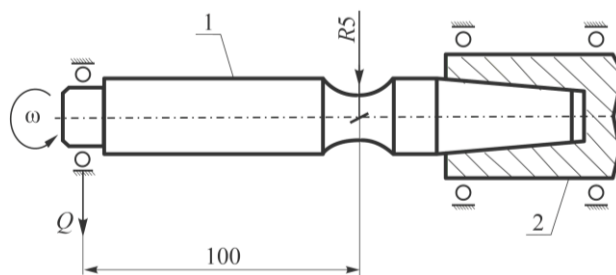


Рисунок 1 – Схема испытания на механическую усталость: 1 – образец; 2 – шпиндель

Таблица 1 – Результаты испытаний образцов из чугуна ВЧТГ на механическую усталость

Номер образца	Изгибающая нагрузка Q, Н	Амплитуда напряжения цикла $\sigma_a$ , МПа	Число циклов нагружения $N_\sigma$ , циклов	Отметка о разрушении
УМК.1	600	600	$1,9 \cdot 10^4$	Да
УМК.2	500	500	$1,4 \cdot 10^4$	Да
УМК.3	400	400	$3,3 \cdot 10^4$	Да
УМК.4	300	300	$1,81 \cdot 10^5$	Да
УМК.5	200	200	$1 \cdot 10^8$	Нет
УМК.6	150	150	$1 \cdot 10^8$	Нет

Обработка экспериментальных данных осуществлялась методом наименьших квадратов [9]. Наклонная ветвь кривой механической усталости в двойных логарифмических координатах представляет собой прямую линию, уравнение которой имеет вид:

$$y = ax + b, \tag{1}$$

где  $x = \lg N_\sigma$  и  $y = \lg \sigma_a$ . Коэффициенты  $a$  и  $b$  определялись из системы

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i, \\ a \sum_{i=1}^n x_i + nb = \sum_{i=1}^n y_i, \end{cases} \tag{2}$$

где  $x_i, y_i$  – абсцисса и ордината  $i$ -й опытной точки соответственно;  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  – порядковый номер образца.

В таблице 2 представлены результаты вычисления значений сумм, входящих в уравнения системы (2).

Таблица 2 – Обработка результатов испытаний методом наименьших квадратов

Номер образца	Результаты испытаний и их обработка					
	$\sigma_a$ , МПа	$N_{\sigma}$ , циклов	$y_i = \lg \sigma_a$	$x_i = \lg N_{\sigma}$	$x_i^2$	$x_i y_i$
УМК.1	600	$1,9 \cdot 10^4$	2,778	4,28	18,318	11,89
УМК.2	500	$1,4 \cdot 10^4$	2,699	4,147	17,198	11,193
УМК.3	400	$3,3 \cdot 10^4$	2,602	4,519	20,421	11,758
УМК.4	300	$1,81 \cdot 10^5$	2,477	5,258	27,647	13,024
$n = 4$	Сумма		10,556	18,204	83,584	47,865

Подстановка полученных значений в формулу (2) приводит к системе линейных уравнений

$$\begin{cases} 83,584a + 18,204b = 47,865, \\ 18,204a + 4b = 10,556, \end{cases} \quad (3)$$

решением которой являются значения  $a = -0,237$ ;  $b = 3,72$ . Следовательно, уравнение наклонного участка кривой усталости имеет вид

$$\lg \sigma_a = -0,237 \lg N_{\sigma} + 3,72. \quad (4)$$

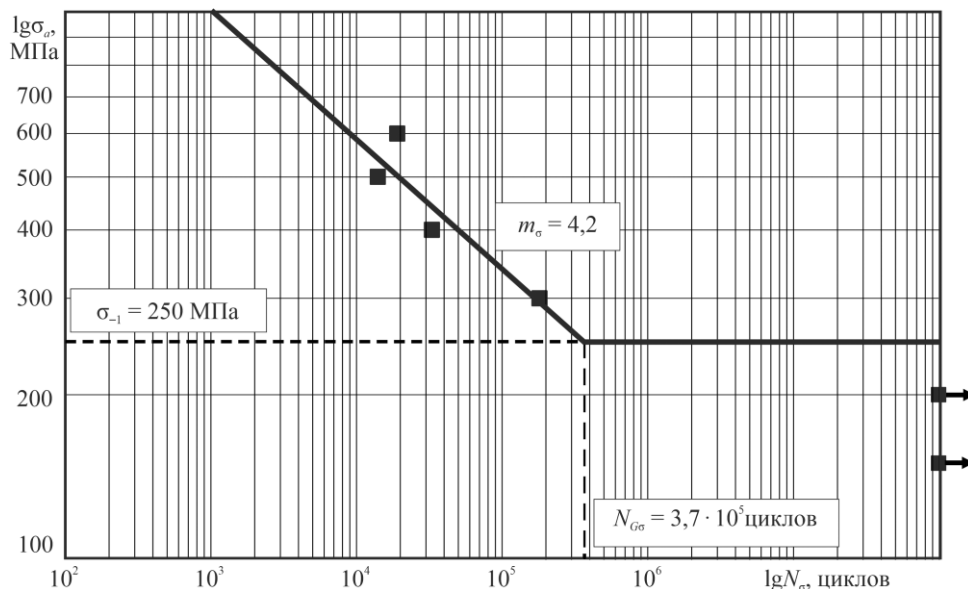


Рисунок 2 – Экспериментальная кривая механической усталости для чугуна ВЧТГ

Кривая контактной усталости представляет собой зависимость максимальных контактных напряжений в центре контактной площадки ( $p_0$ ) от количества циклов ( $N_p$ ) до достижения предельного состояния испытываемой пары трения. Данная кривая – интегральная характеристика свойств сопротивления контактной усталости, позволяющая определить: предел контактной выносливости ( $p_f$ ), абсциссу точки перелома кривой ( $N_{Gp}$ ) и показатель наклона левой ветви кривой контактной усталости ( $m_p$ ) [7].

Для ее построения проведена серия испытаний одинаковых пар трения по схеме вал – ролик (рисунок 3) на полнокомплектной машине для износоусталостных испытаний СИ-03М (ГОСТ 30755-2001) [8]. Образцы, изготовленные из чугуна ВЧТГ, подвергались термообработке при  $T_{\text{ауст}} = 930 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $T_{\text{из.выд}} = 270 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\sigma_b = 1390 \text{ МПа}$ ;  $\delta = 1,8 \%$ ; твердость  $47 \text{ HRC}$ ; ударная вязкость  $KCU = 7,5 \text{ Дж/см}^2$ ); контрообразцы из стали 18ХГТ – цементации на глубину  $\sim 1 \text{ мм}$  ( $\sigma_{-1} = 640 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_b = 1600 \text{ МПа}$ , твердость  $700 \text{ HV}$ ). Испытания проводились непрерывно до достижения предельного состояния или до  $N_b = 10^8$  циклов.

Величина, обратная коэффициенту  $a$ , представляет собой показатель наклона левой ветви кривой усталости  $m_{\sigma}$  [9], который в рассматриваемом случае составляет

$$m_{\sigma} = 1/|a| = 1/0,237 = 4,2. \quad (5)$$

Значение предела выносливости  $\sigma_{-1}$  может быть определено как полусумма наименьшего напряжения, при котором произошло разрушение, и наибольшего при достижении базового числа циклов, что в рассматриваемом случае составляет  $\sigma_{-1} = 250 \text{ МПа}$ . Значение долговечности, соответствующее данному уровню напряжения (абсциссу точки перелома кривой), определяем из выражения (3):  $N_{G\sigma} = 3,7 \cdot 10^5$  циклов. В соответствии с полученными результатами вычислений построена кривая механической усталости в двойных логарифмических координатах  $\lg \sigma_a - \lg N_{\sigma}$  (рисунок 2).

Таким образом выполнена оценка основных характеристик сопротивления механической усталости для высокопрочного чугуна марки ВЧТГ:  $\sigma_{-1} = 250 \text{ МПа}$ ;  $N_{G\sigma} = 3,7 \cdot 10^5$  циклов;  $m_{\sigma} = 4,2$ ; а также коэффициентов уравнения кривой механической усталости испытываемого материала  $a = -0,237$  и  $b = 3,72$ .

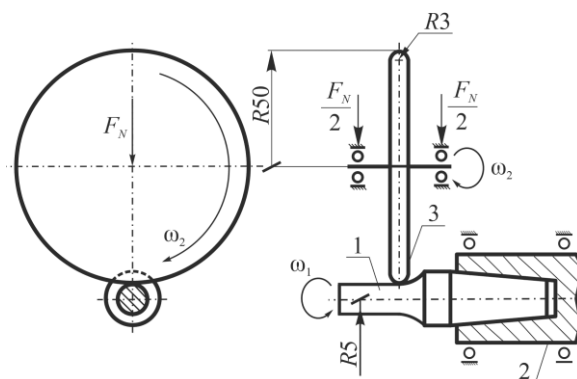


Рисунок 3 – Схема испытания на контактную усталость: 1 – образец ( $\omega_1 = 3000 \text{ мин}^{-1}$ ); 2 – шпиндель; 3 – контрообразец (ролик)

Характерными признаками достижения предельного состояния при контактной усталости являются микро- и макротрещины, отслаивание, единичные или групповые ямки выкрашивания, предельный износ, образование

гребней и вмятин. При этом однозначного ответа на вопрос о выборе критерия для определения опасных форм контактных разрушений и повреждений в широком диапазоне изменения долговечности до настоящего времени, по-видимому, нет [10]. Особенность данных испытаний заключалась в том, что критерием предельного состояния была величина сближения осей образца и контрообразца  $\delta_c = 100$  мкм. Исходные данные и результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты испытаний пар трения (чугун ВЧТГ/сталь 18ХГТ) на контактную усталость

Номер образца	Контактная нагрузка $F_N$ , Н	Максимальные контактные напряжения $p_0$ , МПа	Число циклов нагружения $N_p$ , циклов	Отметка о достижении предельного состояния
УК.1	1000	5600	$2,4 \cdot 10^6$	Да
УК.2	712	5000	$3,0 \cdot 10^6$	Да
УК.3	519	4500	$1,2 \cdot 10^7$	Да
УК.4	365	4000	$1,7 \cdot 10^7$	Да
УК.5	244	3500	$1 \cdot 10^8$	Нет
УК.6	150	3000	$1 \cdot 10^8$	Нет

Анализ экспериментальных данных проводился по методу наименьших квадратов с использованием формул (1) и (2). Результаты представлены в таблице 4.

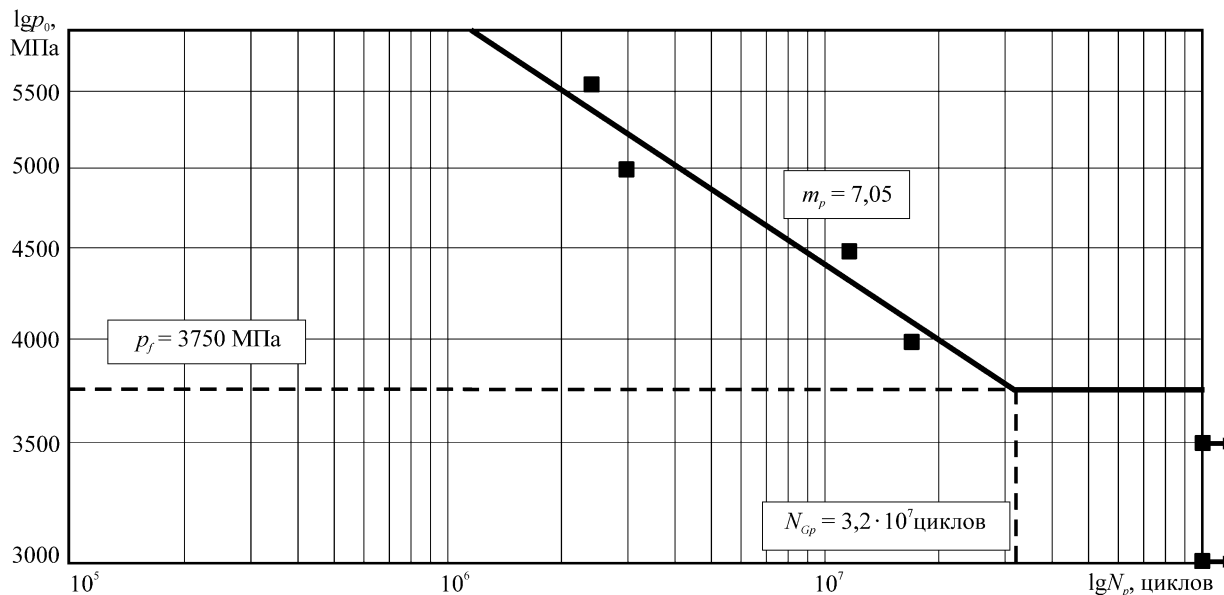


Рисунок 4 – Экспериментальная кривая контактной усталости для чугуна ВЧТГ

Величина предела контактной выносливости определяется аналогично пределу выносливости при механической усталости и составляет  $p_f = 3750$  МПа. Значение долговечности, соответствующее данному уровню напряжения (абсциссу точки перелома кривой), определяется из выражения (7):  $N_{Gp} = 3,2 \cdot 10^5$  циклов.

Как правило, при анализе предельного состояния при контактной усталости приоритет отдается критерию достижения критической плотности ямок выкрашивания. В рассматриваемом случае при принятом в качестве критерия предельного состояния сближении осей образца и контрообразца  $\delta_c = 100$  мкм [10] значение  $p_f$  для чугуна ВЧТГ оказалось выше, чем для сталей, испытанных на тех же базах.

Таблица 4 – Обработка результатов испытаний методом наименьших квадратов

Номер образца	Результаты испытаний и их обработка					
	$p_0$ , МПа	$N_p$ , циклов	$y_i = \lg p_0$	$x_i = \lg N_p$	$x_i^2$	$x_i y_i$
УК.1	5600	$2,4 \cdot 10^6$	3,748	6,386	40,781	23,935
УК.2	5000	$3,0 \cdot 10^6$	3,699	6,477	41,952	23,958
УК.3	4500	$1,2 \cdot 10^7$	3,653	7,063	49,886	25,801
УК.4	4000	$1,7 \cdot 10^7$	3,602	7,23	52,273	26,042
$n = 4$	Сумма		14,702	27,156	184,892	99,736

Подставляем полученные значения в формулу (2)

$$\begin{cases} 184,892a + 27,156b = 99,736, \\ 27,156a + 4b = 14,702, \end{cases} \quad (6)$$

что дает  $a = -0,142$ ;  $b = 4,639$ . Тогда уравнение наклонного участка кривой контактной усталости

$$\lg p_0 = -0,142 \lg N_p + 4,639. \quad (7)$$

Показатель наклона левой ветви кривой контактной усталости  $m_p$  (по аналогии с выражением (5))

$$m_p = 1/|a| = 1/0,142 = 7,05. \quad (8)$$

В соответствии с полученными результатами вычислений построена кривая контактной усталости в двойных логарифмических координатах  $\lg p_0 - \lg N_p$  (рисунок 4).

Тем самым в ходе проведенных испытаний осуществлена оценка основных характеристик сопротивления контактной усталости для высокопрочного чугуна марки ВЧТГ:  $p_f = 3750$  МПа;  $N_{Gp} = 3,2 \cdot 10^7$  циклов;  $m_p = 7,05$ ; а также коэффициентов уравнения кривой контактной усталости для рассматриваемого материала:  $a = -0,142$ ;  $b = 4,72$ .

Таким образом, в ходе исследований получены следующие основные результаты:

– проведены высокоресурсные испытания высокопрочного чугуна с шаровидным графитом марки ВЧТГ на механическую и контактную усталость на базе  $10^8$  циклов; построены кривые усталости в двойных логарифмических координатах;

– для чугуна ВЧТГ установлены основные характеристики сопротивления механической усталости по критерию разрушения ( $\sigma_{-1} = 250$  МПа;  $N_{G\sigma} = 3,7 \cdot 10^5$  циклов;  $m_\sigma = 4,2$ ) и контактной усталости по критерию сближения осей ( $p_f = 3750$  МПа;  $N_{Gp} = 3,2 \cdot 10^5$  циклов;  $m_p = 7,05$ );  
– полученные результаты испытаний стали основой для создания стандарта предприятия ПО «Гомсельмаш» «Методы определения основных механических свойств высокопрочного чугуна с шаровидным графитом» в части, касающейся определения характеристик сопротивления усталости.

#### Список литературы

- 1 Железнодорожные рельсы из высокопрочного чугуна. Постановка проблемы / Л. А. Сосновский [и др.] // Комплексная система содержания инфраструктуры ОАО «РЖД»: материалы науч.-практ. конф., 28 октября 2009 г. – М. : ОАО «РЖД», 2009. – С. 74–78.
- 2 Специальный высокопрочный чугун с шаровидным графитом как конкурент упрочненной стали / В. А. Жмайлик [и др.] // Трибофатика = Tribo-fatigue: тр. VI Междунар. симпозиума по трибофатике МСТФ 2010, Минск, 25 окт. – 1 нояб. 2010 г.: в 2 ч. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: М. А. Журавков (пред.) [и др.]. – Минск, 2010. – Ч. 2. – С. 73–77.
- 3 **Замятнин, В. О.** Структура и свойства специального высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / В. О. Замятнин [и др.] // Трибофатика = Tribo-fatigue: тр. VI Междунар. симпозиума по трибофатике МСТФ 2010, Минск, 25 окт. –

1 нояб. 2010 г.: в 2 ч. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: М. А. Журавков (пред.) [и др.]. – Минск, 2010. – Ч. 2. – С. 79–84.

4 **Цитович, И. С.** Трансмиссии автомобилей / И. С. Цитович, И. В. Каноник, В. А. Вавуло. – Минск : Наука и техника, 1979. – 256 с.

5 **Орлов, А. В.** Испытания конструкционных материалов на контактную усталость / А. В. Орлов, О. Н. Черменский, В. М. Нестеров. – М. : Машиностроение, 1980. – 110 с.

6 **Кораблев, А. И.** Повышение несущей способности и долговечности зубчатых передач / А. И. Кораблев, Д. Н. Решетов; под ред. Д. Н. Решетова. – М. : Машиностроение, 1968. – 288 с.

7 **Сосновский, Л. А.** Механика усталостного разрушения : словарь-справочник / Л. А. Сосновский. – Гомель : НПО "Трибофатика", 1994. – Т. 1. – 328 с.

8 **ГОСТ 30755-2001.** Трибофатика. Машины для износоустойчивых испытаний. Общие технические требования. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2002. – 8 с.

9 **Трошенко, В. Т.** Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник : в 2 т. / В. Т. Трошенко, Л. А. Сосновский. – Киев : Наукова думка, 1987. – Т. 1. – 510 с.

10 **Комиссаров, В. В.** О систематизации критериев надежности зубчатых передач / В. В. Комиссаров // Проблемы безопасности на трансп.: тезисы докл. IV Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 1–2 октября 2007 г. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп.; редкол.: В. И. Сенько (отв. ред.) [и др.]. – Гомель, 2007. – С. 71–72.

Получено 05.04.2012

**S. A. Turin, E. S. Taranova.** High-life tests of VChTG cast iron for contact and mechanical fatigue.

For an estimation of fatigue longevity of engineering materials at a contact stressing and curving (with reference to such responsible objects as railway rails, cog-wheels etc) researches it is necessary to carry on in area high-resource fatigues. In this regard, for the first time, tests were carried out on VChTG grade nodular cast iron for mechanical and contact fatigue on the basis of  $10^8$  cycles; on the basis of the results obtained, the curves of contact and mechanical fatigue were constructed, the main characteristics of the resistance of the material to these types of fatigue were determined. The results obtained were used in the development of the standard of the enterprise PG "Gomselmash", dedicated to the determination of the main mechanical properties of ductile cast iron with spheroidal graphite.