

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Аппель, П.** Теоретическая механика. В 2 т. Т. 2: Динамика системы, аналитическая механика / П. Аппель. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 487 с.
- 2 **Бутенин, Н. В.** Курс теоретической механики. В 2 т. Т. 2: Динамика / Н. В. Бутенин, Я. Л. Лунц, Д. Р. Меркин. – 4-е изд., исправл. – М.: Наука, 1979. – 544 с.
- 3 **Бухгольц, Н. Н.** Основной курс теоретической механики. В 2 т. Т. 2: Динамика системы материальных точек / Н. Н. Бухгольц. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1966. – 332 с.
- 4 **Дмитриевский, А. А.** Внешняя баллистика / А. А. Дмитриевский, Л. Н. Лысенко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. – 608 с.
- 5 **Ландау, Л. Д.** Теоретическая физика: учеб. пособие. В 10 т. Т. 1: Механика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 4-е изд., исправл. – М.: Наука, 1988. – 216 с.
- 6 **Лойцянский, Л. Г.** Курс теоретической механики. В 2 т. Т. 2: Динамика / Л. Г. Лойцянский, А. И. Лурье. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1983 – 640 с.

V. K. TARASOV, S. V. SIDORENKO

ON VIBRATING MOVEMENT OF A ROTATING MISSILE

The vibrating movement of a guided rotating missile is considered. On the basis of dynamic and kinematic Euler's equations the system for differential equations of second order is constructed. The numerical solution determining the missile movement parameters is obtained.

Получено 18.04.2012

ISSN 2227-1104. Механика. Научные исследования
и учебно-методические разработки. Вып. 6. Гомель, 2012

УДК 620.178.3

С. А. ТЮРИН

ПО «ГОМСЕЛЬМАШ», Гомель

Е. С. ТАРАНОВА

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

КОНТАКТНАЯ УСТАЛОСТЬ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ: УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

В работе впервые апробированы методики и представлены результаты ускоренных испытаний на контактную усталость высокопрочного чугуна с шаровидным графитом марки ВЧТГ. Применение данных методов позволило: 1) определить предел контактной выносливости чугуна, численное значение которого сопоставимо с полученным при построении кривой контактной усталости (различие составляет ~ 10 %); 2) сравнить высокопрочный чугун с шаровидным графитом и высокопрочную сталь

по усталостной долговечности при контактном нагружении (по несущей способности различия нет; ресурс чугуна меньше, чем у стали на 2 %). Полученные результаты свидетельствуют о том, что чугун ВЧТГ может быть применен для изготовления зубчатых колес производства ПО «Гомсельмаш» (взамен высокопрочной стали).

На сегодняшний день на ПО «Гомсельмаш» исследуется возможность замены зубчатых колес для бортового редуктора энергетического средства УЭС-2-250, изготавливаемых из стальных поковок, на зубчатые колеса, производимые из аустенитно-бейнитного чугуна с шаровидным графитом [1, 2]. Решение такой задачи позволит в будущем осуществить серьезную технологическую перестройку: использовать для производства большой номенклатуры зубчатых колес не энергоемкую и трудоемкую кузнечно-прессовую технологию, а более простую технологию литья. С этой целью учеными ООО «НПО Трибофатика» и специалистами ПО «Гомсельмаш» разработан высокопрочный чугун с шаровидным графитом (патент № 15617), которому присвоена марка ВЧТГ.

Так как одним из основных повреждающих факторов в зубчатых зацеплениях является контактная усталость, для оценки основных служебных свойств разработанного чугуна необходимо провести соответствующие испытания в части, касающейся характеристик сопротивления контактной усталости. В изучаемом бортовом редукторе УЭС-2-250 эпицикл (изготовленный из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом марки ВЧТГ) входит в зацепление с тремя сателлитами (из высокопрочной стали 18ХГТ), поэтому требуются испытания пары трения чугун/сталь.

Для сокращения времени определения характеристик сопротивления контактной усталости чугуна ВЧТГ и уменьшения количества испытуемых объектов необходимы ускоренные испытания. Если ускоренные методики определения характеристик сопротивления механической усталости известны широко, то для контактной усталости они мало разработаны. Сведения о методике ускоренных испытаний на контактную усталость представлены в стандарте СТБ 1233-2000 [3]. Для чугунов такие методики вообще не апробированы. Поэтому целью работы было разработать и апробировать методы ускоренных испытаний для определения характеристик сопротивления контактной усталости высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.

Метод ускоренного определения предела контактной выносливости чугуна ВЧТГ. Ускоренное определение предела выносливости при механической усталости подробно описано в [4]. Учитывая то обстоятельство, что при контактной усталости реализуются схожие механизмы зарождения и развития повреждений, сделана попытка применить данный метод и для ускоренной оценки предела контактной выносливости (p_f) чугуна ВЧТГ.

Методом ступенчатого нагружения проводят испытание пары трения: задается начальное напряжение $p_{0(0)}$ и ведется испытание в течение n_0 циклов. Без промежуточных пауз напряжение увеличивают на величину Δp до уров-

ня $p_{0(1)}$ и на этом уровне напряжения испытания ведут в течение $n_1 = n_0 = \text{const}$ циклов и т.д. вплоть до достижения парой трения предельного состояния, после чего определяют число циклов на последней ступени нагружения (n_k). Основными критериями предельного состояния при контактной усталости (по ГОСТ 30754-2001 [5]) являются: а) критическая плотность ямок выкрашивания (питтингов) на поверхности трения; б) предельный износ (предельное сближение осей) образца и контрообразца; в) образование поверхностных волн пластичности; г) недопустимая вибрация в системе образец/контробразец.

Для обработки экспериментальных данных на графике зависимости $\lg p_0 - \lg N$ изображают схему испытаний и три условные кривые контактной усталости (охватывающие зону возможного расположения фактической кривой контактной усталости), параметры которых определяют заранее. Для каждой условной кривой контактной усталости подсчитывают суммы относительных долговечностей ($\sum(n_i / N_i)$), по значениям которых и соответствующим им значениям пределов контактной выносливости строят график в координатах $\sum(n_i / N_i) - p_f$. Далее методом графической интерполяции (или экстраполяции) из полученного графика определяют искомое значение предела контактной выносливости p_f , основываясь на гипотезе, согласно которой при испытаниях на контактную усталость условие достижения предельного состояния парой трения (при ступенчатом программном изменении нагрузки) имеет вид

$$\sum_{i=1}^k (n_i / N_i) = 1. \quad (1)$$

где n_i – число циклов наработки за время испытания при напряжении p_i ; N_i – число циклов до достижения предельного состояния при напряжении p_i ; k – число уровней ступенчатого нагружения.

Для экспериментальных исследований были изготовлены модели зубчатых зацеплений из чугуна ВЧГГ ($\sigma_b = 1390$ МПа; $\delta = 1,8\%$; твердость 47 HRC; ударная вязкость $KCU = 7,5$ Дж/см²) и стали 18ХГТ ($\sigma_{-1} = 640$ МПа, $\sigma_b = 1600$ МПа, твердость 700 HV). Элементы изучаемых моделей были подвергнуты термообработке $T_{\text{ауст}} = 930$ °С, $T_{\text{из.выд}} = 270$ °С (образцы из чугуна) и поверхностной закалке (контробразцы из стали) с последующей полировкой рабочих поверхностей. Испытания вели по схеме вал – ролик (рисунок 1) на полнокомплектной машине для износоусталостных испытаний СИ-03М (ГОСТ 30755-2001) [6].

Ускоренное определение предела контактной выносливости проводили при следующих параметрах испытаний:

– начальный уровень максимальных контактных напряжений $p_{0(0)} = 1500$ МПа;

- интервал приращения максимальных контактных напряжений $\Delta p = 500$ МПа;
- длительность ступени нагружения $n_i = 10^5$ циклов = const.

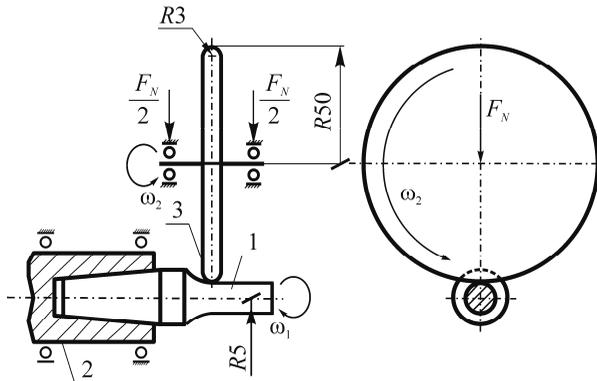


Рисунок 1 – Схемы испытаний моделей зубчатых зацеплений на контактную усталость: 1 – образец; 2 – контрообразец (ролик); 3 – шпиндель

Переход со ступени на ступень осуществляли без промежуточных пауз. Число циклов $n_k \leq n_1, \dots, n_{k-1}$ на последней ступени нагружения определяли достижением предельного состояния. Критерием достижения предельного состояния парой трения было выбрано предельное сближение осей образца и контрообразца δ_c равное 50 мкм. Схема измерения данного параметра, характеризующего процессы деформирования, изнашивания, упрочнения-разупрочнения на любой стадии нагружения, представлена на рисунке 2.

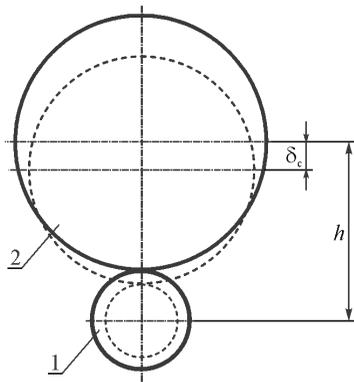


Рисунок 2 – Схема измерения величины δ_c : 1 – образец; 2 – контрообразец (сплошными линиями показаны контуры элементов пары трения до испытаний, пунктирными – после или в процессе испытаний)

Предельное состояние пары трения произошло на 10-й ступени нагружения, число циклов на которой составило 10 циклов. Процесс испытания (многоступенчатая диаграмма) и три условные кривые контактной усталости были нанесены на график $\lg p_0 - \lg N$ (рисунок 3).

Параметры кривых определяли на основании прошлого опыта. Кривую 2 построили по результатам длительных испытаний серии пар трения (чугун ВЧТГ/сталь 18ХГТ) (ожидаемый предел контактной выносливости

$p_f^* = 3750$ МПа). Значения напряжений $p_{f\max}^*$ и $p_{f\min}^*$, соответствующие крайним условным кривым, приняли на 30 % выше и ниже ожидаемого предела контактной выносливости p_f^* . Далее для каждой условной кривой контактной усталости были подсчитаны суммы относительных долговечностей $\Sigma(n_i/N_i)$ (таблица 1). По трем значениям $\Sigma(n_i/N_i)$ и соответствующим им значениям $p_{f\min}^*$, p_f^* , $p_{f\max}^*$ построили график в координатах $\Sigma(n_i/N_i) - p_f$ (рисунок 4).

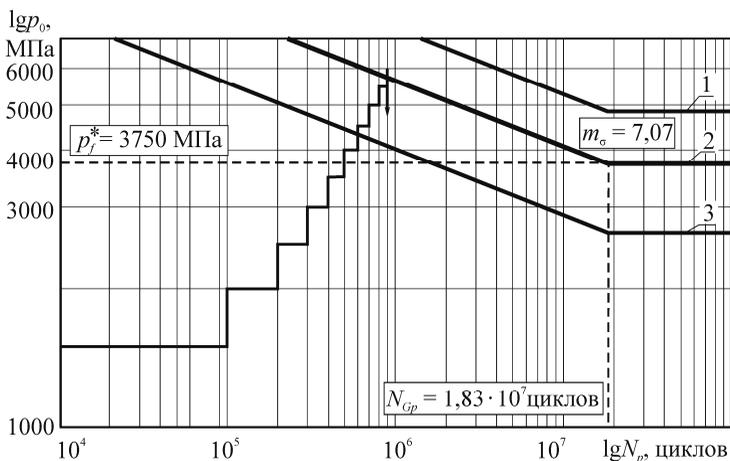


Рисунок 3 – Схема программы ступенчатого нагружения пары трения чугун ВЧТГ/сталь 18ХГТ ($n_i = 105$ циклов)

Таблица 1 – Результаты обработки испытания пары трения чугун ВЧТГ/сталь 18ХГТ на контактную усталость методом ступенчатого нагружения ($n_i = 10^5$ циклов)

№ ст.	p_0 , МПа	Число циклов n	Условная кривая 1 $p_f = 2650$ МПа		Условная кривая 2 $p_f = 3750$ МПа		Условная кривая 3 $p_f = 4850$ МПа	
			N циклов	n/N	N циклов	n/N	N циклов	n/N
0	1500	$1 \cdot 10^5$	∞	0	∞	0	∞	0
1	2000	$1 \cdot 10^5$	∞	0	∞	0	∞	0
2	2500	$1 \cdot 10^5$	∞	0	∞	0	∞	0
3	3000	$1 \cdot 10^5$	$7,7 \cdot 10^6$	0,013	∞	0	∞	0
4	3500	$1 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^6$	0,039	∞	0	∞	0
5	4000	$1 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^6$	0,1	$1,2 \cdot 10^7$	0,009	∞	0
6	4500	$1 \cdot 10^5$	$4,4 \cdot 10^5$	0,23	$5,1 \cdot 10^6$	0,02	∞	0
7	5000	$1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	0,48	$2,4 \cdot 10^6$	0,042	$1,5 \cdot 10^7$	0,007
8	5500	$1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$	0,95	$1,2 \cdot 10^6$	0,081	$7,6 \cdot 10^6$	0,013
9	6000	10	$5,7 \cdot 10^4$	$1,75 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^5$	$1,51 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^6$	$2,45 \cdot 10^{-6}$
$\Sigma(n_i/N_i)$				1,81		0,151		0,02

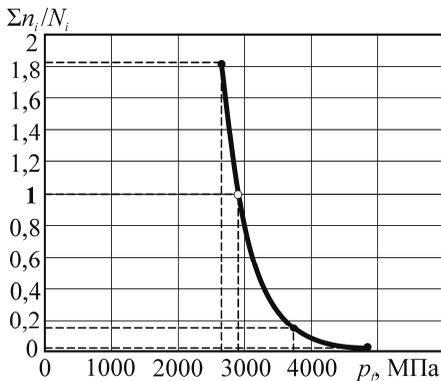


Рисунок 4 – Зависимость пределов выносливости от суммы относительных долговечностей ($n_i = 10^5$ циклов)

По рисунку 4 для $\Sigma(n_i / N_i) = 1$ определили предел контактной выносливости для чугуна ВЧГГ ($p_f = 2913$ МПа). В итоге получили, что различие с методом построения кривой усталости ($p_f^* = 3750$ МПа) составляет $\sim 20\%$. По-видимому, различие в полученных двумя методами результатах связано с тем, что метод ускоренного определения предела контактной усталости применительно к чугунам еще не достаточно апробирован и требует дальнейшего исследования.

Поэтому был проведен еще один эксперимент аналогичный предыдущему, но для него длительность ступени нагружения приняли $n_i = 10^6$ циклов = const. Обработку результатов испытаний вели таким же образом, как было показано выше. Полученные результаты представлены на рисунках 5 и 6, а также в таблице 2. В результате испытаний определили, что достижение предельного состояния парой трения произошло на 8-й ступени нагружения, число циклов на которой составило $6 \cdot 10^5$ циклов.

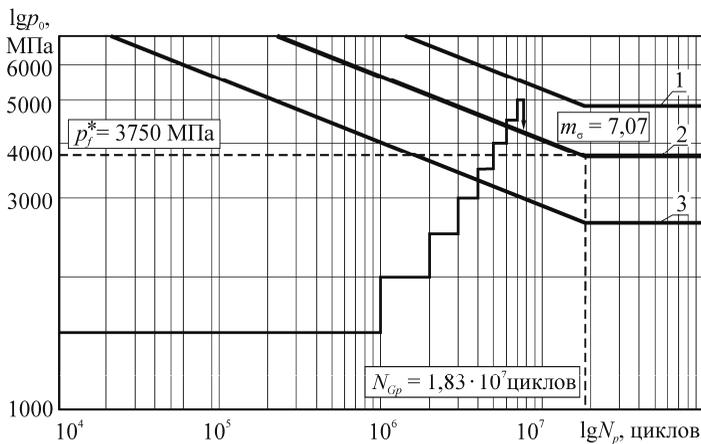


Рисунок 5 – Схема программы ступенчатого нагружения пары трения чугун ВЧГГ/сталь 18ХГТ ($n_i = 10^6$ циклов)

По рисунку 6 для $\Sigma(n_i / N_i) = 1$ определили предел контактной выносливости для чугуна ВЧТГ ($p_f = 3375$ МПа). В итоге получили, что различие с методом построения кривой усталости ($p_f^* = 3750$ МПа) составляет $\sim 10\%$, что в данном случае говорит о достаточно высокой сходимости результатов ускоренных испытаний с результатами испытаний по стандартной методике.

Оценка ресурса и несущей способности чугуна ВЧТГ при контактной усталости методом многоступенчатого нагружения. Сущность метода пояснена на рисунке 7, где представлена программа ступенчатого нагружения – закон изменения во времени максимального контактного давления p_0 (контактной нагрузки F_N).

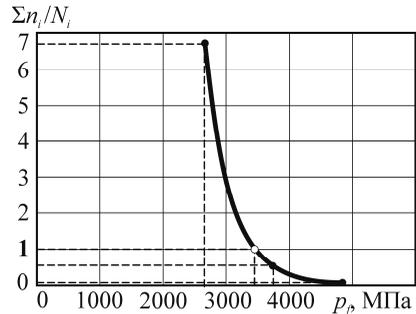


Рисунок 6 – Зависимость пределов выносливости от суммы относительных долговечностей ($n_i = 10^6$ циклов)

Таблица 2 – Результаты обработки испытания пары трения чугуна ВЧТГ/сталь 18ХГТ на контактную усталость методом ступенчатого нагружения ($n_i = 10^6$ циклов)

№ ст.	p_0 , МПа	Число циклов n	Условная кривая 1 $p_f = 2650$ МПа		Условная кривая 2 $p_f = 3750$ МПа		Условная кривая 3 $p_f = 4850$ МПа	
			N циклов	n/N	N циклов	n/N	N циклов	n/N
0	1500	$1 \cdot 10^6$	∞	0	∞	0	∞	0
1	2000	$1 \cdot 10^6$	∞	0	∞	0	∞	0
2	2500	$1 \cdot 10^6$	∞	0	∞	0	∞	0
3	3000	$1 \cdot 10^6$	$7,7 \cdot 10^6$	0,13	∞	0	∞	0
4	3500	$1 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^6$	0,39	∞	0	∞	0
5	4000	$1 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^6$	1	$1,2 \cdot 10^7$	0,09	∞	0
6	4500	$1 \cdot 10^6$	$4,4 \cdot 10^5$	2,3	$5,1 \cdot 10^6$	0,2	∞	0
7	5000	$6 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$	2,9	$2,4 \cdot 10^6$	0,25	$1,5 \cdot 10^7$	0,04
$\Sigma(n_i / N_i)$				6,71		0,53		0,04

Для реализации данной программы предварительно задают: критерий достижения предельного состояния, начальный уровень контактных напряжений p_n (F_n); степень приращения контактных напряжений Δp_i (ΔF_i); продолжительность ступени нагружения n_i . Испытания проводят непрерывно, до достижения предельного состояния по выбранному критерию. Данный метод позволяет в течение короткого времени сопоставить различные материалы по ресурсу и несущей способности при контактной усталости. По имеющимся сведениям для чугунов такой метод не апробирован.

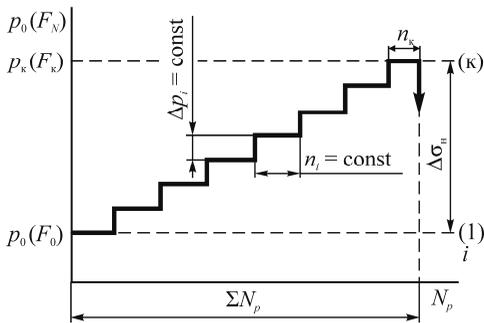


Рисунок 7 – Программа ступенчатого нагружения и основные характеристики ресурса и несущей способности чугуна ВЧТГ при контактной усталости

- интервал приращения контактной нагрузки $\Delta F_i = 50$ Н;
- длительность каждой ступени нагружения $n_i = 10^5$ циклов.

Испытания проводили непрерывно, до достижения предельного состояния – предельное сближение осей образца и контробразца ($\delta_c = 100$ мкм). Установили, что предельное состояние наступило на 13-й ступени нагружения (рисунок 8).

По результатам испытаний определили следующие основные характеристики ресурса и несущей способности чугуна ВЧТГ при контактной усталости:

- предельная контактная нагрузка $F_k = 1100$ Н;
- ресурс $\Sigma N_F = 1,2 \cdot 10^6$ циклов.

Одновременно были проведены аналогичные ускоренные испытания пары трения сталь 18ХГТ/сталь 18ХГТ (рисунок 9). Из данной высокопрочной стали в настоящее время на ПО «ГОМСЕЛЬМАШ» изготавливаются зубчатые колеса. По результатам испытаний получены следующие основные характеристики ресурса и несущей способности высокопрочной стали 18ХГТ при контактной усталости:

- предельная контактная нагрузка $F_k = 1100$ МПа;
- ресурс $\Sigma N_F = 1,22 \cdot 10^6$ циклов.

При сравнении результатов испытания чугуна ВЧТГ (см. рисунок 7) с высокопрочной сталью 18 ХГТ (см. рисунок 8) видно, что по критерию контактной усталости высокопрочный чугун с шаровидным графитом практически не уступает высокопрочной стали – как по нагрузочной способности, так и по долговечности. Это позволяет рекомендовать применение высокопрочного чугуна марки ВЧТГ для изготовления зубчатых колес, а также деталей машин и оборудования ответственного назначения.

Испытание пары трения из высокопрочного чугуна марки ВЧТГ, подвергнутого термообработке при $T_{\text{ауст.}} = 890$ °С, и высокопрочной стали проводили ускоренным методом многоступенчатого нагружения на машине СИ-03М [6] при частоте нагружения 50 Гц [5, 6]. При формировании программы ступенчатого нагружения приняли следующие значения исходных параметров:

- начальный уровень контактной нагрузки $F_n = 200$ МПа;

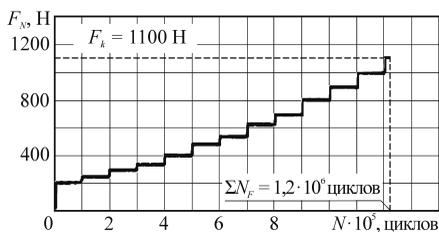


Рисунок 8 – Ускоренная оценка несущей способности и ресурса чугуна ВЧТГ при контактной усталости

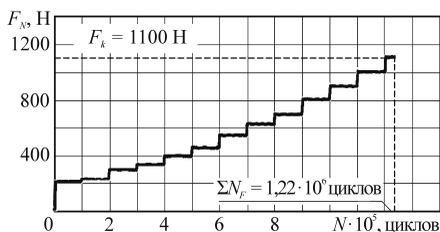


Рисунок 9 – Ускоренная оценка несущей способности и ресурса стали 18ХГТ при контактной усталости

Выводы:

1 В работе выполнена разработка и апробация методик ускоренных испытаний высокопрочного чугуна с шаровидным графитом марки ВЧТГ на контактную усталость.

2 Впервые для высокопрочного чугуна с шаровидным графитом марки ВЧТГ проведено ускоренное определение предела контактной усталости, численное значение которого хорошо коррелирует со значением, полученным методом построения кривой контактной усталости (стандартная методика). Погрешность составляет ~ 10 %.

3 Методом многоступенчатого нагружения проведены испытания моделей зубчатого зацепления при различном сочетании материалов образца и контрол-образца. По полученным результатам сопротивление контактной усталости (ресурс и несущая способность) высокопрочного чугуна марки ВЧТГ находится на таком же уровне, как и у стали 18ХГТ.

4 Таким образом, методика ускоренных испытаний позволяет достаточно быстро и корректно получить ряд характеристик сопротивления контактной усталости, а также произвести сравнение различных пар трения по критерию сопротивления контактной усталости. Результаты испытаний показали, что высокопрочный чугун с шаровидным графитом марки ВЧТГ может быть применим для изготовления зубчатых колес, поскольку в данном случае обеспечиваются приемлемые служебные свойства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Структура и свойства специального высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / В. О. Змятнин [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. – Т. 2. – С. 79–84.

2 Чугуны с шаровидным и вермикулярным графитом и аустенитно-бейнитной матрицей – современные материалы для литых деталей / Н. Н. Александров [и др.]. – Москва: Металлург, 2004. – 419 с.

3 СТБ 1233–2000. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Ускоренные испытания на контактно-механическую усталость. – Введ. 01.10.00. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2007. – 8 с.

4 Трощенко, В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник: в 2 т. / В. Т. Трощенко, Л. А. Сосновский. – Киев: Наукова думка, 1987. – Т. 1. – 510 с.; – Т.2. – 825 с.

5 ГОСТ 30754-2001. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на контактно-механическую усталость. – Введ. 01.07.02. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2002. – 32 с.

6 ГОСТ 30755-2001. Трибофатика. Машины для износоусталостных испытаний. Общие технические требования. – Введ. 01.07.02. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2002. – 8 с.

S. A. TURIN, E. S. TARANOVA

CONTACT FATIGUE OF HIGH-STRENGTH CAST IRON WITH SPHERICAL GRAPHITE: SHORTCUT TESTS

In the paper the techniques are approved and results of the shortcut tests for contact fatigue of high-strength VChTG cast iron with spherical graphite are presented for the first time. The application of given methods has allowed: 1) to define the limit of contact endurance of cast iron the numerical value of which is comparable with the one received at the construction of a curve for contact fatigue (variation is ~ 10 %); 2) to compare high-strength cast iron with spherical graphite and a high-strength steel on fatigue durability at contact load (there is no difference in bearing ability; the resource of cast iron is 2 % less, than of steel). The received results testify that VChTG cast iron can be applied in manufacturing tooth gears for PA «Gomselmash» (instead of high-strength steel).

Получено 21.02.2012

**ISSN 2227-1104. Mechanics. Scientific researches and methodical development.
Vol. 6. Gomel, 2012**

UDC 620.171.5

P. FRANKOVSKÝ, K. MASLÁKOVÁ

Technical University of Košice, Slovakia

PRINCIPLE AND APPLICATIONS OF PHOTOSTRESS® METHOD

The aim of this paper is to present optical method PhotoStress® and its use in experimental analysis of main relative deformations and main normal stresses on photoelastically coated structural elements and their systems. The method can also be applied in static and dynamic stress analyses of elements of mechanical systems of various shape and material.