

11 **Сосновский, Л. А.** Трибофатика: проблемы и перспективы: доклад на тематической выставке АН СССР "Математика и механика – народному хозяйству" / Л.А. Сосновский. – Гомель: БелИИЖТ, 1989. – 65 с.

12 **Corrosion fatigue** / edited by O. Devereus [et al.]. – Houston. Texas: National Ass. of Corrosion Eng, 1972. – 172 p.

L. A. SOSNOVSKY, E. S. TARANOVA

INFLUENCE OF ENVIRONMENT ON RESISTANCE OF FATIGUE

Action of a working environment on fatigue properties of cyclically deformable metal is shown. The circuit of the basic mechanisms of the back effect connected with adsorptional fatigue is developed. Ordering of researches is executed in the field of direct and a back effect at corrosion-mechanical fatigue.

Получено 21.02.2012

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

УДК 620.178.3

Е. С. ТАРАНОВА

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

С. А. ТЮРИН

ПО «ГОМСЕЛЬМАШ», г. Гомель

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСКОРЕННАЯ ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ

В работе представлен анализ ряда методов, с помощью которых определяют характеристики сопротивления усталости. Впервые для высокопрочного чугуна с шаровидным графитом марки ВЧТГ проведены ускоренные испытания на механическую усталость, в результате которых получены основные характеристики сопротивления усталости. Выполнено определение несущей способности и ресурса по изгибной прочности для высокопрочной стали и высокопрочного чугуна. Сравнительный анализ полученных результатов показал, что по данным критериям свойства чугуна ВЧТГ близки по значениям к высокопрочной стали (различие составляет 16–19 %). Это позволяет сделать заключение о том, что высокопрочный чугун с шаровидным графитом марки ВЧТГ может быть применен для изготовления зубчатых колес.

В настоящее время существует много практических примеров того, что аустенитно-бейнитные чугуны с шаровидным графитом (АБЧШГ) могут быть успешно применены взамен стальных кованных деталей [1–7]. Учеными ООО «НПО Трибофатика» совместно со специалистами ПО «Гомсельмаш»

разработан специальный высокопрочный чугун с шаровидным графитом (патент № 15617) марки ВЧГГ. Анализ показал, что данный чугун является перспективным для изготовления зубчатых колес, предназначенных для эксплуатации в бортовом редукторе энергетического средства УЭС-2-250 производства ПО «Гомсельмаш». Для оценки основных количественных характеристик служебных свойств данного чугуна и сравнения их со свойствами высокопрочных сталей необходимы соответствующие испытания, которые позволят в короткие сроки с требуемой погрешностью экспериментально определить необходимые для сравнения и дальнейших исследований характеристики сопротивления усталости.

На рисунке 1 дана классификация существующих методов определения характеристик сопротивления усталости [8]. Наиболее точные результаты дает экспериментальный метод (многообразцовый), который позволяет определить искомые характеристики путем построения кривой усталости (ГОСТ 25.502-79). Однако это весьма длительный и трудоемкий процесс. Поэтому разработаны методики, дающие возможность определить характеристики сопротивления усталости за более короткое время и при испытании меньшего количества образцов (малообразцовые и безобразцовые), которые называют ускоренными.



Рисунок 1 – Классификация методов определения характеристик сопротивления усталости

Ускоренным методам определения характеристик сопротивления усталости посвящено большое количество работ, в которых представлены подробная классификация и сравнительный анализ методов ускоренной расчетно-экспериментальной оценки характеристик сопротивления усталости [9–24]. Они основываются на различных гипотезах накопления усталостного повреждения в материалах. Учитывают различные физические процессы, протекающие в материалах при циклическом нагружении. Используют различные расчетные схемы для определения предела выносливости (σ_1), дают

различную экономию времени и средств и имеют различные области применения. Выбор того или иного метода осуществляется исходя из поставленной задачи и на основе оптимального сочетания экономии времени и образцов при обеспечении необходимой точности определения характеристики сопротивления усталости [9].

Методы ускоренной расчетно-экспериментальной оценки предела выносливости условно можно разделить на четыре группы [23], при которых образцы испытывают:

1) при циклическом нагружении без доведения до разрушения. Устанавливается и реализуется связь σ_{-1} с напряжениями, при которых в исследуемом материале начинает проявляться (интенсифицироваться) необратимое накопление усталостного повреждения;

2) в условиях регулярного нагружения с доведением до разрушения при малых долговечностях. Оценка σ_{-1} базируется на уравнении кривой усталости, в которое σ_{-1} входит как параметр. Для определения его коэффициентов требуется построение начального участка кривой усталости. В этой группе следует различать методы: а) основывающиеся на формальном использовании известных эмпирических уравнений кривых усталости; б) позволяющие определить σ_{-1} по начальному участку кривой усталости на основе физических обоснованных моделей усталостного разрушения;

3) используя эффект повышения частоты испытания, что позволяет быстро построить кривые усталости;

4) методом ускоренного определения σ_{-1} при программном изменении нагрузки.

Методики ускоренного определения предела выносливости хорошо апробированы для сталей и, по имеющимся сведениям, отсутствуют для чугунов. Поэтому была поставлена задача, впервые применить методы ускоренных испытаний к чугунам.

В работе использована методика ускоренных испытаний при многоступенчатом нагружении в соответствии с СТБ 1233-2000 [25]. Все испытания выполнены согласно требованиям ГОСТ 30754-2001 [26].

Метод ускоренного определения предела выносливости чугуна ВЧТГ. Данный метод основан на линейной гипотезе суммирования повреждений Пальмгрена-Майнера, в соответствии с которой условие разрушения при ступенчатом программном изменении нагрузки на образец при его испытании на усталость имеет вид

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

где n_i – число циклов наработки за время испытания при напряжении σ_i ; N_i – число циклов до разрушения при напряжении σ_i ; k – число уровней ступенчатого нагружения.

Методом ступенчатого нагружения (согласно [9]) проводят испытание одного образца, графически изображая диаграмму ступенчатого нагружения. Оптимальный интервал начального уровня напряжений σ_0 задают неравенством $1,0\sigma_{-1}^* < \sigma_0 < 1,2\sigma_{-1}^*$, где σ_{-1}^* – ожидаемое значение предела выносливости, устанавливаемое по условным кривым усталости 1, 2 и 3, которые накладывают на ступенчатую диаграмму испытания. Параметры данных кривых, которые охватывают зону возможного расположения фактической кривой усталости, определяют предварительно – либо экспериментально, либо на основании прошлого опыта. Оптимальный интервал приращения напряжений $\Delta\sigma$ задают неравенством $0,05\sigma_{-1} < \Delta\sigma < 0,15\sigma_{-1}$.

Проведение испытаний: образец нагружают начальным напряжением $\sigma_{a(0)}$ и испытывают в течение n_0 циклов. Без промежуточных пауз напряжение увеличивают на величину $\Delta\sigma$ до уровня $\sigma_{a(1)}$ и на этом уровне напряжения испытания ведут в течение $n_1 = n_0$ циклов и т.д. вплоть до достижения образцом предельного состояния. Число циклов на последней ступени нагружения (n_k) определяется достижением образцом предельного состояния и может быть меньше или равно $n_k \leq n_1, \dots, n_{k-1}$.

Обработка и анализ результатов испытаний: для каждой условной кривой усталости подсчитывают суммы относительных долговечностей ($\Sigma(n_i / N_i)$) и строят график в координатах $\Sigma(n_i / N_i) - \sigma_{-1}$, по которому методом графической интерполяции (или экстраполяции) определяют искомое значение предела выносливости σ_{-1} .

Ускоренное определение предела выносливости образца из чугуна ВЧТГ, механические характеристики которого после термообработки ($T_{\text{ауст.}} = 930^\circ\text{C}$ и $T_{\text{из.выд.}} = 270^\circ\text{C}$): предел прочности $\sigma_b = 1390$ МПа; относительное удлинение $\delta = 1,8\%$; твердость 47 HRC ; ударная вязкость $KCU = 7,5$ Дж/см², проводили по схеме, представленной на рисунке 2. Испытания вели на машине для износоусталостных испытаний СИ-03М при частоте 3000 мин^{-1} , нормальной температуре и влажности окружающей среды в соответствии с ГОСТ 15150-69. Параметры испытательной машины удовлетворяли всем требованиям стандарта ГОСТ 30755-2001 [27]. Основные технические характеристики машины приведены в таблице 1, а общий вид представлен на рисунке 3.

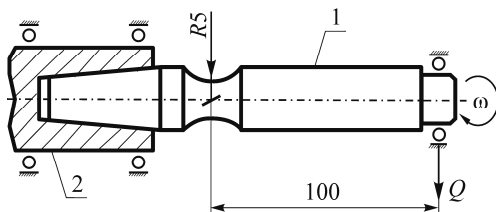


Рисунок 2 – Схема испытания на механическую усталость:
1 – образец; 2 – шпиндель

Таблица 1 – Технические характеристики модульной машины серии СИ-03М

Показатель	Пара трения
	цилиндр – колодка, цилиндр – ролик
Диаметр рабочей части образца, мм	10
Размеры контрообразца, мм	10×10×11,5; Ø100
Диапазон частот вращения образца, мин ⁻¹	600–6000
Диапазон частот вращения контрообразца, мин ⁻¹	50–500
Диапазон изгибающих нагрузок, Н	10–800
Диапазон контактных нагрузок, Н	10–2000
Диапазон измерения суммарного износа образца и контрообразца, мкм	10–4000
Диапазон измерения момента трения, Н · м:	
– при трении скольжения	0,01–1,2
– при трении качения	0,2–20



Рисунок 3 – Общий вид универсальной испытательной машины СИ-03М для износоусталостных испытаний

Для испытания образца из чугуна ВЧТГ были заданы следующие параметры:

- начальный уровень амплитуды изгибных напряжений $\sigma_{a(0)} = 220$ МПа;
- интервал приращения амплитуды изгибных напряжений $\Delta\sigma = 60$ МПа;
- длительность ступени нагружения $n_i = 10^5$ циклов = const.

Переход со ступени на ступень осуществляли без промежуточных пауз до достижения образцом предельного состояния. Критерием предельного состояния было выбрано разделение образца на две части. В результате испытаний определили, что разрушение образца произошло на 4-й ступени нагружения, число циклов на которой составило $n_k = 3,7 \cdot 10^4$ циклов.

Процесс испытания (многоступенчатая диаграмма) и три условные кривые усталости были нанесены на график $\lg \sigma_a - \lg N$ (рисунок 4). При этом параметры кривых определяли на основании предыдущего опыта. Кривую 2 построили по результатам длительных испытаний серии образцов из чугуна ВЧТГ ($\sigma_{-1}^* = 250$ МПа). Значения напряжений $\sigma_{-1 \max}^*$ и $\sigma_{-1 \min}^*$, соответствующие крайним условным кривым, приняли на 30 % выше и ниже ожидаемого предела выносливости σ_{-1}^* . Далее для каждой условной кривой усталости были подсчитаны суммы относительных долговечностей $\Sigma(n_i / N_i)$ (таблица 2). По трем значениям $\Sigma(n_i / N_i)$ и соответствующим им значениям $\sigma_{-1 \min}^*$, σ_{-1}^* , $\sigma_{-1 \max}^*$ построили график в координатах $\Sigma(n_i / N_i) - \sigma_{-1}$ (рисунок 5).

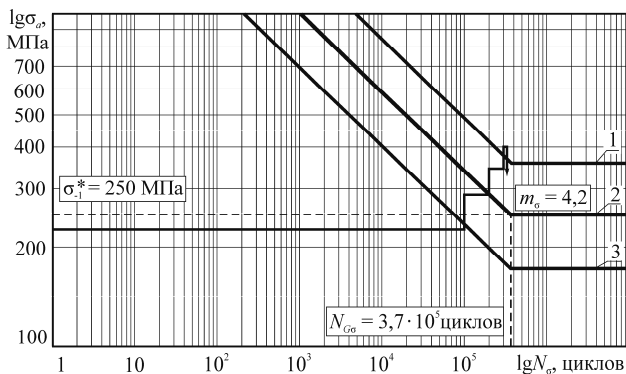


Рисунок 4 – Схема программы ступенчатого нагружения образца из чугуна ВЧТГ

Таблица 2 – Результаты обработки испытания образца из чугуна ВЧТГ на механическую усталость методом ступенчатого нагружения

N ст.	σ_a , МПа	Число циклов n	Условная кривая 1 $\sigma_{-1} = 175$ МПа		Условная кривая 2 $\sigma_{-1} = 250$ МПа		Условная кривая 3 $\sigma_{-1} = 375$ МПа	
			N циклов	n/N	N циклов	n/N	N циклов	n/N
0	220	$1 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^5$	0,71	∞	0	∞	0
1	280	$1 \cdot 10^5$	$5,1 \cdot 10^4$	1,96	$2,3 \cdot 10^5$	0,42	∞	0
2	340	$1 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^4$	4,44	$1 \cdot 10^5$	0,97	$3,1 \cdot 10^5$	0,33
3	400	$3,7 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^4$	3,26	$5,2 \cdot 10^4$	0,71	$1,5 \cdot 10^4$	0,24
$\Sigma(n_i / N_i)$				10,37		2,1		0,57

По рисунку 5 для $\Sigma(n_i / N_i) = 1$ определили предел выносливости для чугуна ВЧТГ ($\sigma_{-1} = 270$ МПа). В итоге получили, что различие с методом построения кривой усталости ($\sigma_{-1}^* = 250$ МПа) составляет 10 %. Это говорит о достаточно высокой сходимости результатов ускоренных испытаний с результатами испытаний по стандартной методике. При этом сроки определения σ_{-1} (по результатам ускоренных испытаний) сократились в несколько раз.

Оценка ресурса и несущей способности чугуна ВЧТГ методом многоступенчатого нагружения.

Сущность метода пояснена на рисунке 6, где представлена программа ступенчатого нагружения – закон изменения во времени амплитуды напряжения цикла σ_a . Для реализации данной программы предварительно задают: критерий достижения предельного состояния, начальный уровень напряжений σ_n ; степень приращения напряжений $\Delta\sigma_i$; 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 механической усталости.

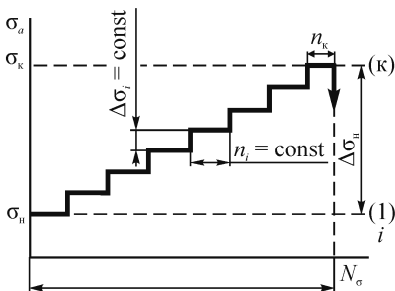


Рисунок 6 – Программа ступенчатого нагружения и основные характеристики ресурса и несущей способности чугуна ВЧТГ при механической усталости

$T_{\text{уст.}} = 890$ °С, проводили ускоренным методом многоступенчатого нагружения на машине СИ-03М (см. рисунок 3) [27] по схеме консольный изгиб с вращением (см. рисунок 2) при частоте нагружения 50 Гц [25, 26]. При формировании программы ступенчатого нагружения приняли следующие значения исходных параметров:

- начальный уровень амплитуды напряжений цикла $\sigma_n = 300$ МПа;
- интервал приращения амплитуды напряжений цикла $\Delta\sigma_i = 60$ МПа;
- длительность каждой ступени нагружения $n_i = 10^5$ циклов = const.

Испытание образца проводили непрерывно, до достижения предельного состояния – разрушения образца на части (произошло на седьмой ступени нагру-

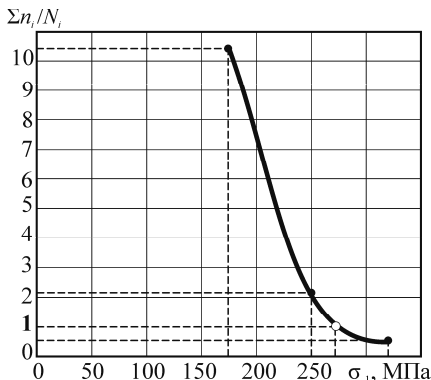


Рисунок 5 – Зависимость пределов выносливости от суммы относительных долговечностей

жения). По результатам испытаний (рисунок 7) были определены следующие основные характеристики ресурса и несущей способности чугуна ВЧТГ: предельное напряжение при изгибе $\sigma_k = 650$ МПа; ресурс $\sum N_\sigma = 6,5 \cdot 10^5$ циклов.

Одновременно были проведены аналогичные ускоренные испытания образца из высокопрочной стали 18ХГТ ($\sigma_1 = 640$ МПа, $\sigma_b = 1600$ МПа, твердость 700 HV) (рисунок 8). В настоящее время из данного материала на ПО «Гомсельмаш» изготавливаются зубчатые колеса. По результатам испытаний были получены следующие основные характеристики ресурса и несущей способности стали 18ХГТ: предельное напряжение при изгибе $\sigma_k = 775$ МПа; ресурс $\sum N_\sigma = 8,1 \cdot 10^5$ циклов. Разрушение образца произошло на 9-й ступени нагружения.

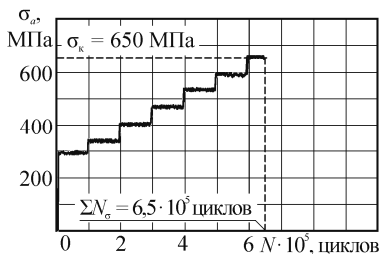


Рисунок 7 – Ускоренная оценка несущей способности и ресурса чугуна ВЧТГ при механической усталости

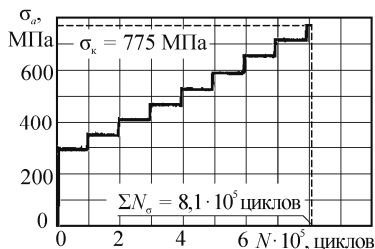


Рисунок 8 – Ускоренная оценка несущей способности и ресурса стали 18ХГТ при механической усталости

При сравнении результатов испытаний чугуна ВЧТГ со сталью 18ХГТ видно, что наблюдается некоторое различие: по несущей способности на ~16 % и ресурсу на ~19 %. Полученный результат позволяет рекомендовать применение высокопрочного чугуна марки ВЧТГ (при соответствующих режимах термообработки) для изготовления зубчатых колес.

Выводы:

1 Проанализированы методы определения характеристик сопротивления усталости.

2 Впервые для высокопрочного чугуна с шаровидным графитом марки ВЧТГ апробированы методики и представлены результаты ускоренных испытаний по определению ряда характеристик сопротивления усталости: предел выносливости, ресурс и несущая способность.

3 Определенное по ускоренному методу значение предела выносливости чугуна ВЧТГ хорошо коррелирует со значением, полученным методом построения кривой усталости (стандартная методика). Погрешность составляет ~ 10 %.

4 Проведено сравнение экспериментально определенных характеристик усталостной долговечности чугуна ВЧТГ и высокопрочной стали 18ХГТ. Различие составило: по несущей способности на ~16 % и по ресурсу на ~19 %. Полученные результаты, позволяют предположить, что высоко-

прочный чугун с шаровидным графитом марки ВЧГГ по критерию изгиба может быть применим для изготовления зубчатых колес, поскольку при этом обеспечиваются приемлемые служебные свойства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Беликов, А. И.** Отливки из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / А. И. Беликов, Л. А. Жуков, Д. Н. Маццарелли. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.

2 **Шебагинов, М. П.** Высокопрочный чугун в машиностроении / М. П. Шебагинов. – Москва: Машиностроение, 1988. – 216 с.

3 **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.

4 **Корниенко, Э. Н.** Разработка высокопрочных чугунов с повышенными специальными свойствами / Э. Н. Корниенко, М. С. Колесников. – Набережные Челны: КамПИ, 1999. – 293 с.

5 **Зборщик, А. М.** Доменный чугун с шаровидным графитом для крупных отливок / А. М. Зборщик, И. П. Бычков. – Москва: Машиностроение, 1995. – 128 с.

6 **Корниенко, Э. Н.** Перспективы производства отливок ЧШГ аустенитно-бейнитного класса / Э. Н. Корниенко, А. Г. Панов, Д. Ф. Хальфин. – Елабуга: ООО НЭК, 2001. – 213 с.

7 **Щеголюк, Н. И.** Сравнительные исследования конструкционной прочности чугуна и стали / Н. И. Щеголюк. – Литейное производство, 1993. – № 9. – С. 6–8.

8 **Сосновский, Л. А.** Механика усталостного разрушения: словарь-справочник / Л. А. Сосновский. – Гомель: НПО «Трибофатика», 1994. – Т. 1. – 328 с.; Т. 2. – 340 с.

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

10 **Машиностроение.** Энциклопедия. Т. II-1. Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов / Л. В. Агамиров [и др.]; под общ. ред. Е. И. Мамаевой. – М.: Машиностроение, 2010. – 852 с.

11 **Степнов, М. Н.** Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник / М. Н. Степнов. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.

12 **Степнов, М. Н.** Расчетные методы оценки характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций / М. Н. Степнов. – М.: МАТИ, 2003. – 120 с.

13 **Бойцов, Б. В.** Статистический анализ точности метода ускоренных испытаний / Б. В. Бойцов // Заводская лаборатория. – 1972. – № 9. – С. 1129–1132.

14 **Дерягин, Г. А.** Применение ускоренных методов испытаний для определения пределов выносливости алюминиевого сплава Д16Т / Г. А. Дерягин, Ю. К. Штовба, Э. И. Шнеерова // Заводская лаборатория. – 1967. – № 9. – С. 870–873.

15 **Дмитриченко, С. С.** Современные методы ускоренных испытаний машин на сопротивление усталости / С. С. Дмитриченко // Вестник машиностроения. – 1967. – № 2. – С. 7–12.

16 **Жук, Е. И.** О применении методов Про и Локати / Е. И. Жук // Заводская лаборатория. – 1970. – № 1. – С. 87–89.

17 **Иванова, В. С.** Ускоренный метод определения предела усталости по критическому напряжению усталости / В. С. Иванова // Заводская лаборатория. – 1960. – № 5. – С. 593–598.

18 Кудрявцев, И. В. О методе определения предела выносливости по испытанию одного образца / И. В. Кудрявцев // Заводская лаборатория. – 1961. – № 4. – С. 434–441.

19 Ромашов, Р. В. К методике ускоренного определения предела выносливости / Р. В. Ромашов, В. В. Федоров, В. Л. Соболев // Заводская лаборатория. – 1980. – № 7. – С. 658–660.

20 Соболев, В. Л. Совершенствование методики ускоренной оценки предела выносливости при испытаниях со ступенчато изменяющейся нагрузкой / В. Л. Соболев // Заводская лаборатория. – 1977. – № 11. – С. 1401–1405.

21 Соболев, В. Л. Сравнительная оценка точности различных методов ускоренных испытаний на усталость / В. Л. Соболев, С. П. Евстратова // Вестник машиностроения. – 1970. – № 10. – С. 45–49.

22 Соболев, В. Л. Экспериментальная оценка точности некоторых методов ускоренных испытаний на усталость / В. Л. Соболев, С. П. Евстратова // Заводская лаборатория. – 1968. – № 7. – С. 863–866.

23 Трощенко, В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении / В. Т. Трощенко. – Киев: Наукова думка, 1981. – 343 с.

24 Школьник, Л. М. Методика усталостных испытаний: Справочник / Л. М. Школьник. – М.: Машиностроение, 1978. – 302 с.

25 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; Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2007. – 8 с.

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

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

E. S. TARANOVA, S. A. TURIN

THE EXPERIMENTAL SHORTCUT ESTIMATION OF FATIGUE RESISTANCE FOR HIGH-STRENGTH CAST IRON WITH SPHERICAL GRAPHITE

In work the analysis of some methods with which help define characteristics of resistance of weariness is presented. For the first time for high-strength pig-iron with spherical graphite of mark VChTG the accelerated tests for mechanical weariness in which result the basic characteristics of resistance of weariness are received are conducted. Definition of bearing ability and a resource on flexural durability for a high-strength steel and high-strength pig-iron is executed. The comparative analysis of the received results has shown that by the given criteria of property of pig-iron VChTG are close on values to a high-strength steel (distinction makes 16–19 %). It allows to make the conclusion that high-strength pig-iron with spherical graphite of mark VChTG can be applied to manufacturing of cogwheels.

Получено 21.02.2012