

УДК 620.17:621.891

И. Н. ЛИС, НИЛ динамики, прочности и износостойкости, Лидский колледж УО «Гродненский государственный университет им. Я. Купалы», Лида

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ИЗНОСОУСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СИЛОВОЙ СИСТЕМЕ ВАЛ (СТАЛЬ 45) / ВКЛАДЫШ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫСОКОПРОЧНЫЙ ЧУГУН ВЧТГ) ПРИ ФРИКЦИОННО-МЕХАНИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ

Изложены результаты испытания узла трения и силовой системы на фрикционную и фрикционно-механическую усталость при главном вращательном движении образца в условиях консольного изгиба с вращением на основе стандартных цилиндрических образцов диаметром рабочей части 10 мм из стали 45 и контрообразцов-вкладышей из высокопрочного чугуна ВЧТГ с шаровидным графитом при разной термообработке. Представлены экспериментальные значения характеристик сопротивления фрикционной и фрикционно-механической усталости исследуемых узла трения и силовой системы, дан анализ результатов испытаний.

**Введение.** Многие узлы машин работают в условиях трения или фрикционно-механической усталости. Поэтому к материалам для их изготовления предъявляются не только высокие требования к прочности, но и определенные требования к триботехническим характеристикам. Целью работы является экспериментальное получение характеристик сопротивления фрикционной и фрикционно-механической усталости нового материала [1, 2] – специального высокопрочного чугуна с шаровидным графитом ВЧТГ в зависимости от режимов термообработки.

**Методика испытаний.** Проводились испытания металл-металлической силовой системы на фрикционную (ФУ) и фрикционно-механическую усталость (ФМУ) в соответствии с СТБ 1448–2004 [3]. Максимальные напряжения изгиба при испытании в условиях ФМУ поддерживались на одинаковом уровне  $0,7\sigma_{-1}$ , где  $\sigma_{-1} = 320$  МПа – предел выносливости образца (вала) стали 45 при симметричном цикле изгиба. Цилиндрический образец 1 из стали 45 с диаметром рабочей части 10 мм консольно закреплялся в шпинделе 2 испытательной машины УКИ-6000-2 и приводился во вращение с частотой  $3000 \text{ мин}^{-1}$  (рисунок 1). Контрообразец-вкладыш 3 призматической формы размерами  $10 \times 10 \times 10 \text{ мм}^3$ , выполненный из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом с особыми служебными свойствами марки ВЧТГ (патент РУП «Гомсельмаш» и ООО «НПО ТРИБОФАТИКА»), прижимался к опасному сечению образца 1 контактной нагрузкой  $F_N$ , величину которой задавали при помощи специального приспособления и поддерживали постоянной в процессе испытания каждой пары «образец – контрообразец». Испытания проводились в условиях сухого трения в воздухе. Использовали контрообразцы двух типов: 1 – без термообработки, 2 – с термообработкой (закалка + отжиг при температуре  $300^\circ\text{C}$ ).

В качестве предельного состояния был принят суммарный износ пары «образец – вкладыш»  $i_{\text{пред}} = 1000 \text{ мкм}$ , а база испытаний составила  $10^7$  циклов. Образцы и контрообразцы взвешивались на аналитических весах с точностью 0,1 мг до и после испытаний для определения массового износа. Для определения величины линейного износа в процессе испытаний периодически проводилось измерение с помощью индикаторной головки с точностью 2 мкм в локальных 8 точках по периметру опасной зоны образца.

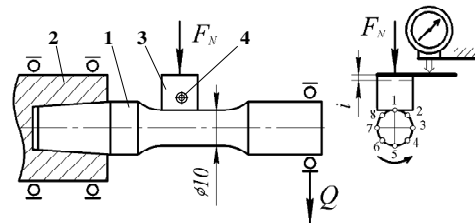


Рисунок 1 – Схема испытания на фрикционную (при  $Q = 0$ ) и фрикционно-механическую (при  $Q > 0$ ) усталость: 1 – образец; 2 – шпиндель; 3 – контрообразец; 4 – место контроля температуры

Для обеспечения точности и достоверности измерений и исключения влияния погрешностей установки обеспечивалась начальная приработка каждой пары трения при контактной нагрузке  $F_N = 60,2 \text{ Н}$  в течение 50 000 циклов.

Измерение температуры проводилось бесконтактным пирометром в одной и той же точке на поверхности контрообразца (см. поз. 4 на рисунке 1).

**Результаты испытаний.** Рассмотрим кинетику изменения среднего износа по 8 локальным точкам по периметру опасной зоны образца. На рисунке 2 показаны кинетические кривые накопления износа при испытании в условиях ФУ ( $\sigma_a = 0$  МПа, штриховые линии) и ФМУ ( $\sigma_a = 224$  МПа, сплошные линии) при значениях контактной нагрузки  $F_N$  от 20 до 92 Н силовых систем с вкладышами из ВЧТГ без термообработки. Видно, что интенсивность изнашивания при испытаниях в условиях ФМУ во всем диапазоне изменения контактной нагрузки  $F_N$  ниже, чем при испытаниях в условиях ФУ. То есть в условиях эксперимента циклические изгибающие напряжения оказывают положительное влияние на долговечность силовой системы, что согласуется с известными результатами испытаний других силовых систем [4–8].

На рисунке 3 показаны кинетические кривые накопления износа при испытании в аналогичных условиях силовых систем с вкладышами из ВЧТГ с термообработкой (закалка + отжиг при температуре  $300^\circ\text{C}$ ). При значениях контактной нагрузки 60 Н и более характер соотношения интенсивностей изнашивания при ФУ и ФМУ сохраняется (сравни рисунки 2 и 3). Иначе выгля-

дит соотношение интенсивностей изнашивания при низких значениях контактной нагрузки – интенсивность изнашивания при ФМУ становится выше.

Результаты испытаний серии исследуемой пары трения представлены на рисунках 4, 5 в виде кривых фрикционной усталости (сплошные линии) в координатах «контактная нагрузка  $F_N$  – число циклов  $N$ » до наступления предельного состояния (суммарный износ пары «образец – вкладыш»  $i_{пред} = 1000$  мкм). Рисунок 4 иллюстрирует опытные данные для чугунных вкладышей без термообработки, а рисунок 5 – с термообработкой (закалка + отжиг при температуре 300 °С). Видно, что обе кривые фрикционной усталости состоят из двух ветвей: левой с большим наклоном и правой – с меньшим наклоном к горизонтальной оси.

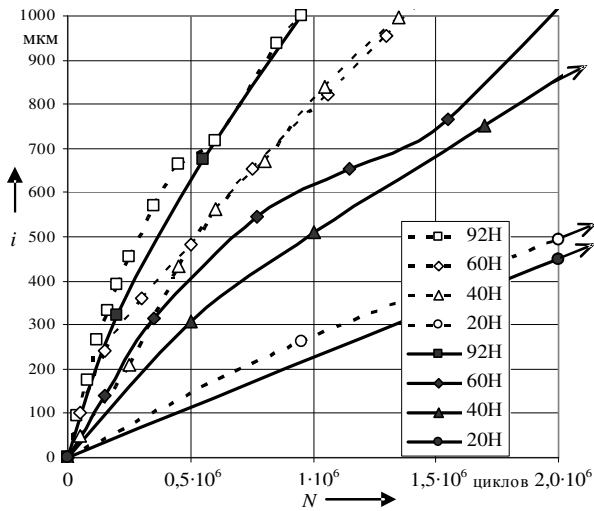


Рисунок 2 – Кинетические кривые накопления износа при  $\sigma_a = 0$  МПа (штриховые линии) и  $\sigma_a = 224$  МПа (сплошные линии) при различных значениях контактной нагрузки  $F_N$  (вкладыш из ВЧТГ без термообработки)

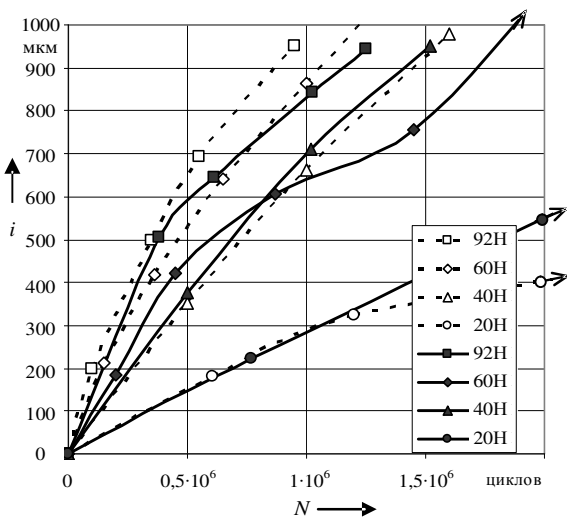


Рисунок 3 – Кинетические кривые накопления износа при  $\sigma_a = 0$  МПа (штриховые линии) и  $\sigma_a = 224$  МПа (сплошные линии) при различных значениях контактной нагрузки  $F_N$  (вкладыш из ВЧТГ при термообработке «закалка + отжиг при температуре 300 °С»)

Из рисунков 4, 5 видно, что полученные кривые фрикционно-механической усталости (штриховые ли-

нии), по-видимому, в отличие от кривых фрикционной усталости (сплошные линии), можно аппроксимировать одной наклонной линией, по крайней мере, в изученном диапазоне контактных нагрузок и долговечностей и при заданной амплитуде циклических напряжений изгиба.

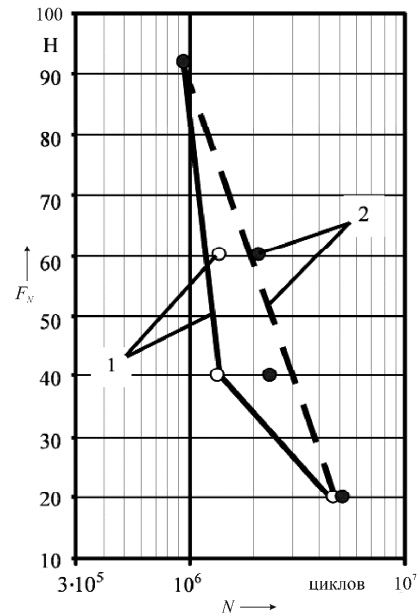


Рисунок 4 – Кривые фрикционной (1) и фрикционно-механической (2) усталости пары трения и силовой системы «сталь 45 (нормализация) – высокопрочный чугун ВЧТГ с шаровидным графитом (без термообработки)»

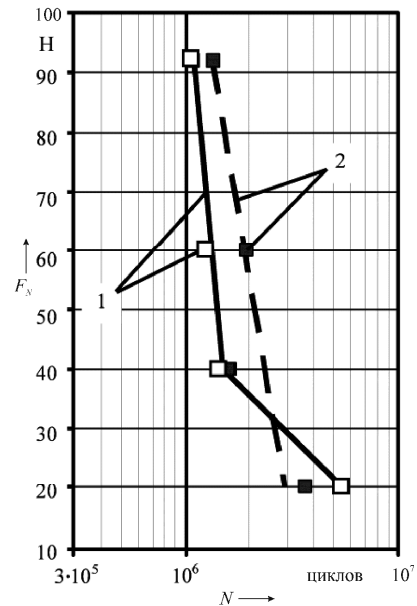


Рисунок 5 – Кривые фрикционной (1) и фрикционно-механической (2) усталости пары трения и силовой системы «сталь 45 (нормализация) – высокопрочный чугун ВЧТГ с шаровидным графитом (термообработка «закалка + отжиг при температуре 300 °С»)»

Сравнивая построенные по принятому критерию предельного состояния кривые фрикционной и фрикционно-механической усталости для пары трения и силовой системы «сталь 45 – высокопрочный чугун ВЧТГ с шаровидным графитом без термообработки» (см. рисунок 4), можно отметить, что при относительно высоких значениях контактной нагрузки  $F_N > 90$  Н предельный

износ достигается при фрикционно-механической усталости ( $\sigma_a > 0$ , штриховая линия) несколько быстрее, чем в условиях чистого трения скольжения ( $\sigma_a = 0$ , сплошные линии). В области средних контактных нагрузок  $\sim 20 \text{ Н} < F_N < \sim 85 \text{ Н}$  добавление циклических напряжений изгиба низкого уровня  $\sigma_a = 0,7\sigma_{-1} = 224 \text{ МПа}$  приводит к замедлению процесса изнашивания чугунного вкладыша. Так, при  $F_N = 40 \text{ Н}$  число циклов до наступления предельного износа увеличивается  $\sim$  в 2 раза по сравнению с изнашиванием при трении скольжения (когда  $\sigma_a = 0$ ). При низких значениях контактной нагрузки ( $F_N < 40 \text{ Н}$ ), по-видимому, интенсивность изнашивания при ФМУ будет преобладать по сравнению с обычным трением скольжения при прочих равных условиях (см. рисунок 4).

Если сравнивать построенные по принятому критерию предельного состояния кривые фрикционной и фрикционно-механической усталости для пары трения и силовой системы «сталь 45 – высокопрочный чугун ВЧТГ с шаровидным графитом при термообработке (закалка + отжиг при температуре  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ )» (см. рисунок 5), можно отметить, что при средних значениях контактной нагрузки  $\sim 40 \text{ Н} < F_N < \sim 100 \text{ Н}$  предельный износ достигается при фрикционно-механической усталости ( $\sigma_a > 0$ , штриховая линия) несколько медленнее, чем в условиях чистого трения скольжения ( $\sigma_a = 0$ , сплошные линии); причем наклон левой ветви кривой фрикционной усталости почти равен наклону кривой фрикционно-механической усталости. При низких значениях контактной нагрузки ( $F_N < 30 \text{ Н}$ ) интенсивность изнашивания при ФМУ оказывается выше, чем при обычном трении скольжения при прочих равных условиях (см. рисунок 5).

Значения характеристик фрикционной и фрикционно-механической усталости силовой системы «сталь 45 – высокопрочный чугун ВЧТГ с шаровидным графитом» представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики кривых фрикционной и фрикционно-механической усталости силовой системы сталь 45 – высокопрочный чугун ВЧТГ с шаровидным графитом

Характеристика	Значение характеристик ВЧТГ	
	без термообработки	с термообработкой
Предел ограниченной выносливости при фрикционной усталости, Н (на базе $3 \cdot 10^6$ циклов)	$F_{FN} = 27$	$F_{FN} = 30$
То же при фрикционно-механической усталости, Н (на базе $3 \cdot 10^6$ циклов)	$F_{f\sigma N} = 38$	$F_{f\sigma N} = 18$
Абсцисса точки перелома кривой усталости, цикл	$N_{FG} = 1,4 \cdot 10^6$	$N_{FG} = 1,5 \cdot 10^6$
Показатель наклона левой ветви кривой фрикционной усталости	$m_F = 1,0$	$m_F = 0,651$
То же фрикционно-механической усталости	$m_{F\sigma} = 1,41$	$m_{F\sigma} = 0,69$
Показатель наклона правой ветви кривой фрикционной усталости	$m_F = 1,41$	$m_F = 1,39$

На рисунке 6 даны характерные фото испытанных образцов и вкладышей. Любопытно, что на дорожке трения стального образца можно наблюдать «намазывание» графита с чугунного вкладыша, даже при весьма низкой контактной нагрузке (20 Н – см. рисунок 6). При

этом с ростом величины контактной нагрузки и, по-видимому, числа циклов нагружения это «намазывание» из фрагментарного переходит в практически сплошное. Явление «намазывания» графита на поверхность образца наблюдалось на всех испытанных образцах.

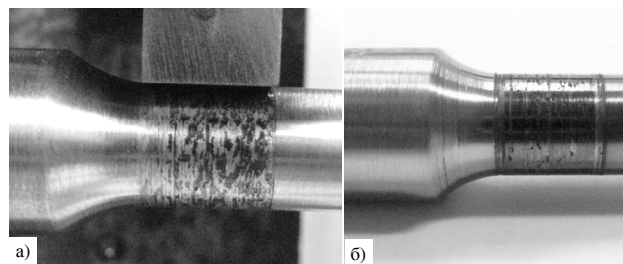


Рисунок 6 – На поверхности образца наблюдается графитная пленка: а – при контактной нагрузке  $F_N = 20 \text{ Н}$  и наработке  $N = 50$  тыс. циклов; б – при контактной нагрузке  $F_N = 92 \text{ Н}$  и наработке  $N = 1300$  тыс. циклов

**Заключение.** Выполнено экспериментальное исследование характеристик сопротивления фрикционной и фрикционно-механической усталости высокопрочного чугуна с шаровидным графитом с особыми служебными свойствами в зависимости от режимов термообработки. Получены численные значения характеристик сопротивления фрикционной и фрикционно-механической усталости (см. таблицу 1), построены кинетические кривые среднего износа силовой системы «цилиндрический образец из стали 45 – призматический вкладыш из ВЧТГ (без термообработки и с термообработкой «закалка + отжиг при температуре  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ )» при разных значениях контактной нагрузки (см. рисунки 2, 3), а также кривые ФУ и ФМУ для исследуемой силовой системы (см. рисунки 4, 5). Установлено, что добавление циклических напряжений изгиба низкого уровня  $\sigma_a = 0,7\sigma_{-1} = 224 \text{ МПа}$  в большинстве случаев приводит к замедлению процесса изнашивания чугунного вкладыша. Так, при  $F_N = 40 \text{ Н}$  число циклов до наступления предельного износа увеличивается приблизительно в 2 раза по сравнению с изнашиванием при трении скольжения (когда  $\sigma_a = 0$ ).

Обнаружено в условиях опыта (см. рисунок 6), что на дорожке трения стального образца при ФУ и ФМУ происходит «намазывание» графита с чугунного вкладыша.

#### Список литературы

- 1 Чугун и сталь в трибофатических системах современных машин и оборудования / Л. А. Сосновский [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – № 4 (29). – С. 5–20.
- 2 Сталь и чугун: конкуренция продолжается в области высокопрочных состояний / Л. А. Сосновский [и др.] // Машины, технологии и материалы для современного машиностроения: тр. Междунар. конф., посвященной 75-летию Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 21–22 нояб. 2013 г. – М.: ИМАШ РАН им. А. А. Благонравова, 2013. – С. 99.
- 3 Трибофатика. Методы износоустойчивых испытаний. Испытания на фрикционно-механическую усталость (Стандарт Беларуси): СТБ 1448–2004. – Введ. 01.09.2004. – Мн.: ГОССТАНДАРТ, 2004. – 14 с.
- 4 Шарай, В. Т. Комплексное исследование износа и усталости у сталей / В.Т. Шарай. – Киев: Изд-во техн. лит. УССР, 1959. – 32 с.
- 5 Носовский, И. Г. Влияние циклического нагружения на триботехнические характеристики стали 45 / И. Г. Носовский,

В. Ф. Лабунец, О. Н. Белас // Проблемы трения и изнашивания : респ. межвед. сб. – Киев, 1991. – Вып. 39. – С. 17–21.

6 **Цыбанев, Г. В.** Влияние величины и длительности циклического нагружения на триботехнические характеристики стали / Г. В. Цыбанев, О. Н. Белас // Проблемы прочности. – 2005. – №1. – С. 96 – 107.

7 Сосновский, Л.А. Механика износоусталостного повреждения / Л.А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 2007. – 434 с.

8 Экспериментальное исследование закономерностей обратного эффекта силовой системы «сталь 45 – силумин» при фрикционно-механической усталости / А. В. Богданович [и др.] // Тр. VI Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 окт. – 1 нояб. 2010 г., Минск (Беларусь) / редкол. : М. А. Журавков (пред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2010. – Т. 1. – С. 527–532.

Получено 26.02.2016

**I. N. Lis.** Laws accumulated of wear-fatigue damage in active systems shaft (steel 45) – insert (special ductile iron VCHTG) at mechano-sliding fatigue.

The results of testing the friction unit and active system at sliding and mechano-sliding fatigue of the main rotary motion of the sample in a cantilever bending with rotation based on standard cylindrical samples with a diameter of the working part 10 mm made of steel 45 and inserts from nodular iron VCHTG at different heat treatment. The experimental values of resistance and friction characteristics of mechano-sliding fatigue study friction unit and active system, the analysis of the test results.