

УДК 620.178.3

Л.А. СОСНОВСКИЙ, д-р техн. наук; В.В. КОМИССАРОВ, канд. техн. наук;
Е.С. ТАРАНОВА

УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель

С.А. ТЮРИН, канд. техн. наук

ПО «Гомсельмаш», Республика Беларусь

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОСТРОЕНИЕ ПОЛНОЙ КРИВОЙ КОНТАКТНОЙ
УСТАЛОСТИ ПАРЫ «ВЫСОКОПРОЧНЫЙ ЧУГУН ВЧТГ / СТАЛЬ 18ХГТ»
И ЕЕ АНАЛИЗ**

Выполнено экспериментальное построение полной кривой контактной усталости в диапазоне циклической долговечности от $N_p = 1$ (статическое нагружение) до 10^8 циклов на базе интегрального критерия достижения предельного состояния (сближения осей образца и контробразца $\delta_c = \delta_{lim} \sim 100$ мкм) при испытании контактной пары «высокопрочный чугун ВЧТГ / сталь 18ХГТ». Установлены основные закономерности и получены основные характеристики сопротивления контактной усталости. Предложен и построен паспорт работоспособности исследуемой пары.

Ключевые слова: контактная усталость, контактная пара, полная кривая контактной усталости, критерий предельного состояния, сближение осей, выкрашивание

Введение. Полной называют кривую механической усталости, построенную в широком диапазоне изменения циклических напряжений σ_a , таким, что усталостное разрушение металлических образцов реализуется в интервале циклической долговечности от $N_\sigma = 1$ (при $\sigma_a = \sigma_b$, σ_b — предел прочности при растяжении) до $N_\sigma = 10^8 \dots 10^9$ циклов (при $\sigma_a \ll \sigma_b$) [1]. Методика построения такой кривой разработана [2, 3] и установлены основные закономерности сопротивления усталости стали в указанных условиях испытаний. Применительно к фрикционной усталости пары сталь / полимер полная кривая впервые получена экспериментально только в работах [4, 5], при этом показано, что характер кривых усталости, построенных в двойных логарифмических (или полулогарифмических) координатах нагрузка — число циклов до достижения предельного состояния, при механической и фрикционной усталости аналогичен, хотя ведущие механизмы повреждения и критерии достижения предельного состояния в обоих случаях принципиально различны. Так, предельное состояние в первом случае — это усталостное разрушение стального образца (разделение его на две части), а во втором — достижение величины предельного (или допустимого) износа. Анализ различий механизмов повреждения можно найти в работах [1–5].

Как известно, зубчатые передачи могут работать как при очень малых, так и при очень больших контактных нагрузках [6], так что типы их разрушения соответствуют разным значениям циклической долговечности и соответственно разным участкам полной кривой контактной усталости. По имеющимся сведениям [7, 9–16 и др.] полная кривая контактной усталости (при трении качения), до сих пор не построена. Трудность состоит не столько в том, что для

построения такой кривой требуются очень большие затраты времени и средств, сколько в том, что не ясной (и поэтому нерешенной) остается главная проблема: по какому критерию достижения предельных состояний может и должна быть построена полная кривая контактной усталости? В этой связи можно констатировать, что полная кривая контактной усталости имеет большое практическое значение для описания поведения материалов во всем диапазоне их контактного нагружения, а также для получения новой информации, что будет способствовать развитию общей теории контактной усталости.

Исследования в области контактной усталости получили развитие в первой половине XX века. При этом в качестве контактной пары принимали либо зубчатое зацепление, либо систему «ролик — ролик». Последняя стала классической после обоснования роликовой аналогии [7]. К настоящему времени испытания на контактную усталость выполняют по схемам: качение без проскальзывания; качение с постоянным проскальзыванием; качение с тяговым моментом; качение с тормозным моментом; пульсирующий контакт (при нормальной, повышенной или пониженной температурах, со смазкой или без нее, в различных агрессивных средах) на двухроликовых либо трехроликовых машинах [7, 8, 13–15].

Контактную усталость обычно характеризуют двумя параметрами: нагрузкой и циклической долговечностью. В качестве нагрузки принимают либо абсолютное значение нормальной нагрузки F_N , либо максимальное давление p_0 в центре контактной площадки. Предел контактной выносливости, как правило, определяют на базе $5 \cdot 10^7 - 2 \cdot 10^8$ циклов (в зависимости от материала) [13, 15]. Переход в предельное состояние связывают с началом прогрессирующего поверхностного выкрашива-

ния материала. Критерием достижения предельного состояния считают образование ямок выкрашивания критической плотности или критической глубины. При этом принимают либо предельную величину ямки выкрашивания, либо заданное количество ямок выкрашивания, либо повреждение до 50 % поверхности ямками выкрашивания [13, 17–22]. Кривую контактной усталости обычно строят в многоциклового области по результатам испытаний на 5–6 уровнях контактного давления. При этом экспериментально определяют три основных характеристики сопротивления контактной усталости: предел контактной выносливости p_f на принятой цикловой базе, абсциссу точки перелома кривой контактной усталости N_{gp} , показатель наклона левой ветви кривой контактной усталости m_p [17].

Как уже отмечалось выше, полная кривая контактной усталости до настоящего времени построена не была, потому что в условиях испытания (например, при высоких нагрузках) предельное состояние инициируется большой остаточной деформацией, а не ямками выкрашивания. С целью построения полной кривой контактной усталости нами выбрана схема испытаний на двухроликовой машине [7]. Эта схема реализуется на современной установке с возможностью автоматической регистрации всех параметров (задаваемых и регистрируемых) при испытаниях [17, 23, 24]. С целью обеспечения сопоставимости определяемых характеристик сопротивления контактной усталости при проведении испытаний в различных условиях нагружения нами был принят интегральный параметр состояния поврежденности контактной пары — сближение осей образца и контробразца (δ_c) (рисунок 1) [17, 24, 25]. Этот параметр обобщенно принимает во внимание (учитывает) не только наличие ямок выкрашивания, но и величину суммарного износа элементов контактной пары, а также величину упругопластической деформации на любой стадии нагружения. Таким образом, δ_c -параметр оказывается обобщенным.

Цель работы — экспериментальное построение полной кривой контактной усталости в интервале циклической долговечности от 1 до 10^8 циклов по принятому критерию предельного состояния и определение основных характеристики сопротивления контактной усталости для случая испытания материалов зубчатых колес (сталь 18ХГТ, чугун ВЧГГ).

Выбор величины δ_c как критерия ПС. Трудной оказывается проблема установления предельной величины $\delta_c = \delta_{lim}$. В первом приближении она может быть решена следующим образом: следует установить некоторую наперед заданную величину $\delta_c = \delta_{lim}$, такую, чтобы при ее достижении механическое состояние контактной пары можно было считать критическим. Здесь можно поступить аналогично тому, как это было предложено в работе [1] при разработке критерия достижения крити-

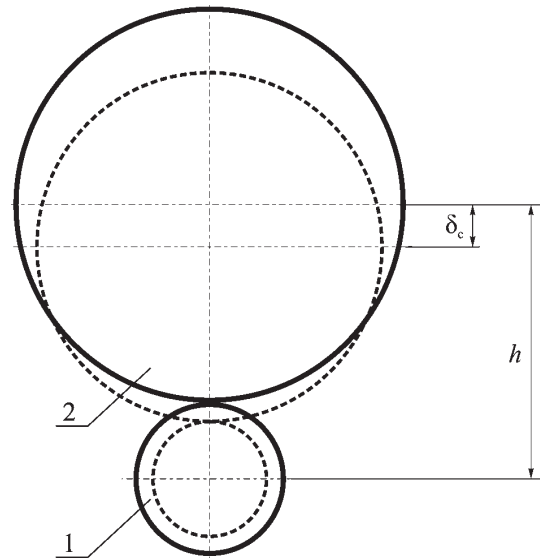


Рисунок 1 — Схема измерения величины сближения осей δ_c при трении качения: 1 — образец; 2 — контробразец (сплошные линии — контуры элементов контактной пары до испытаний, пунктирными — после или в процессе испытаний)

ческого состояния при механической усталости по критерию трещинообразования: задается величина длины трещины усталости, достижение которой и есть предельное состояние образца по трещинообразованию.

Так как появление выкрашивания сопровождается резким повышением уровней шума и вибрации [7, 26–29], то были проведены исследования с фиксацией момента достижения предельного состояния по величине сближения осей и общего уровня шума и вибрации (рисунок 2). Было установлено, что в условиях опыта при величине сближения осей порядка $\delta_c \sim 100$ мкм наблюдалось резкое усиление шума и вибрации в испытываемой зоне.

Данные выводы подтверждаются некоторыми результатами других исследователей [26, 30]. Так, в работе [26] отмечено, что для прямозубых термоулучшенных колес недопустимому повреждению (повреждение ножек зуба и распространение выкрашивания на головку) соответствуют предельные значения циклической погрешности $f_{z\text{гор}} = 80 \div 110$ мкм. В данном случае изменение

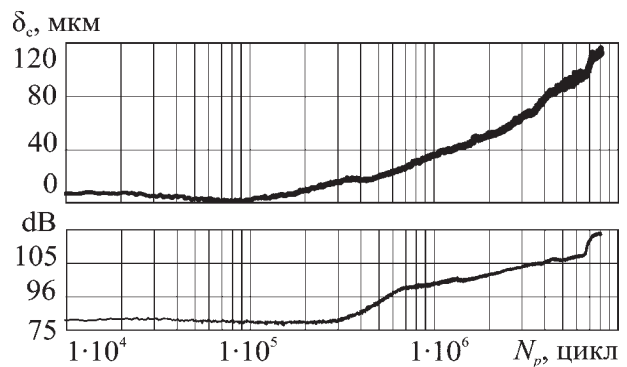


Рисунок 2 — Регистрируемое в процессе испытаний на контактную усталость контактной пары «чугун ВЧГГ (образец) / сталь 18ХГТ» (ролик) изменение сближения осей и уровня шума

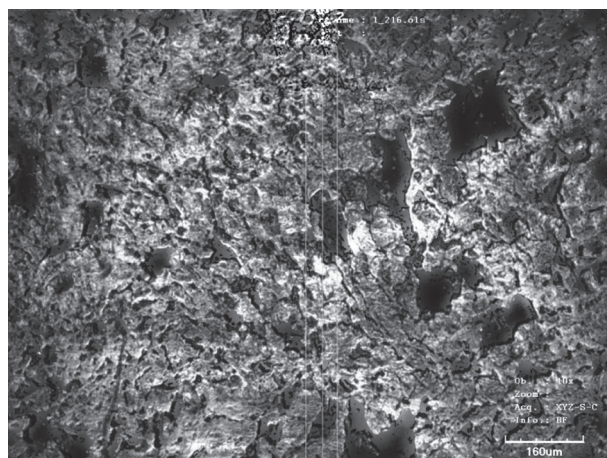
первоначальной геометрии профиля вследствие выкрашивания, пластических деформаций и изнашивания приводит к возникновению дополнительных динамических нагрузок, повышенного уровня шума и другим дефектам. Из работы [30] следует, что износ по профилю зубьев колес КМБ локомотива ЧМЭЗ всего на 0,1 мм приводит уменьшению радиуса кривизны в 3 раза и к возрастанию контактных напряжений в 1,7 раза, а для зубчатых колес мультипликатора компрессора «Demag» Vк-25 данные изменения наблюдаются уже при износе в 0,01 мм. Эти состояния в известном смысле следует считать критическими (т. е. предельными).

В работе [26] также подчеркнуто, что взаимосвязь между величинами относительной площади ямок выкрашивания и наибольшей глубиной ямок выкрашивания соответствует этим результатам испытаний. Проведенные нами исследования дорожки катания подтвердили это утверждение (рисунок 3). Можно видеть, при достижении сближения осей порядка 100 мкм образуются ямки выкрашивания различной величины, свидетельствующие об интенсивном повреждении поверхности. При этом измерения глубины таких повреждений показывают, что она находится в диапазоне 15–30 мкм. По данным работы [26], такие повреждения являются выбраковочными значениями зубчатых колес автотракторных трансмиссий с модулем, равным 4–6.

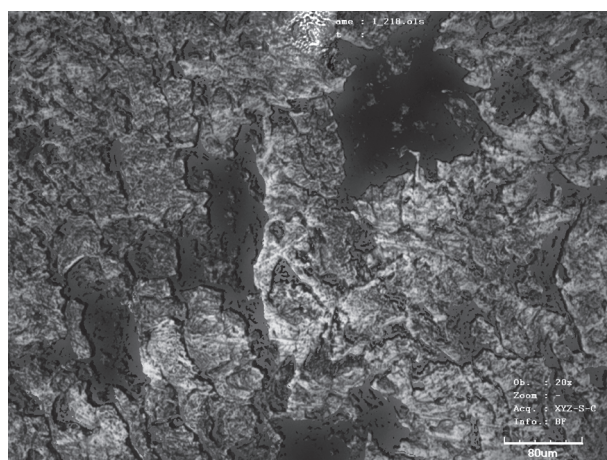
Таким образом, можно констатировать, что в условиях проводимых исследований критерий предельного состояния при контактной усталости в виде достижения величины сближения осей, равной $\delta_{\text{lim}} \sim 100$ мкм, является в первом приближении приемлемым и обоснованным, так как он хорошо коррелирует и с величиной повреждения взаимодействующих поверхностей и с уровнем шума, возникающим в исследуемом сопряжении.

Методика испытаний. Как показали результаты соответствующих исследований [2–5], при построении полных кривых механической и фрикционной усталости испытания необходимо проводить: 1) на объектах единого типоразмера и изготовленных из одного материала; 2) на одной испытательной машине; 3) при постоянной частоте во всем диапазоне нагружения; 4) при одинаковом критерии достижения предельного состояния для всех режимов испытаний. Данный общий подход и был использован при экспериментальном построении полной кривой контактной усталости в диапазоне циклической долговечности от 1 до 10^8 циклов на базе принятого и обоснованного интегрального критерия $\delta_{\text{lim}} = 100$ мкм.

На контактную усталость была испытана контактная пара типа вал (образец)/ролик (контрол-образец), представленная на рисунке 4. Образцы, изготовленные из высокопрочного чугуна с ша-



a



б

Рисунок 3 – Наблюдаемое повреждение поверхности чугуного образца при достижении $\delta_e = 100$ мкм:

а – увеличение $\times 200$; б – увеличение $\times 500$

ровидным графитом ВЧТГ, подвергались термообработке $T_{\text{ауст.}} = 930$ °С, $T_{\text{из.выд.}} = 270$ °С (предел прочности при растяжении $\sigma_b = 1390$ МПа; относительное удлинение при разрыве $\delta = 1,8$ %; твердость 47 HRC; ударная вязкость $KCU = 7,5$ Дж/см²); контрол-образцы из стали 18ХГТ – цементации на глубину ~ 1 мм (предел выносливости $\sigma_{-1} = 640$ МПа, $\sigma_b = 1600$ МПа, твердость 700 HV). Испытуемые объекты были изготовлены по технологии, приме-

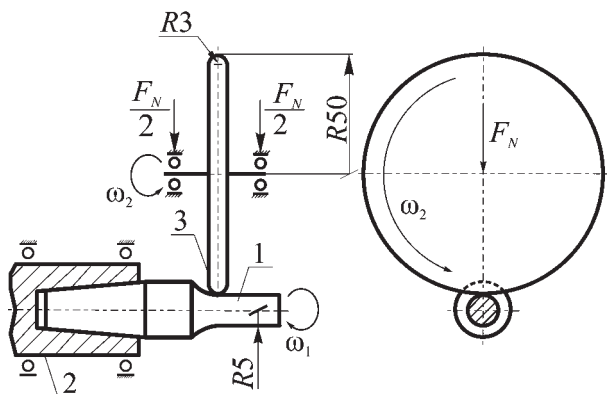


Рисунок 4 – Схема испытания на контактную усталость: 1 – образец; 2 – шпиндель; 3 – контрол-образец (ролик)

няемой для эпициклических зубчатых колес бортовых редукторов самоходных сельскохозяйственных комбайнов производства ПО «Гомсельмаш».

Испытания были проведены на машине для износоусталостных испытаний СИ-03М (ГОСТ 30755-2001) [23]. Частота вращения образцов на всех уровнях нагружения была одинаковой и составляла 3000 мин⁻¹. Испытания проводили непрерывно до достижения предельного состояния (предельное сближение осей образца и контробразца $\delta_{\text{lim}} = 100$ мкм) или до базового числа циклов ($N_b = 10^8$ циклов). При испытаниях в зону контакта подавали капельным способом (3 капли в 2 мин) трансмиссионное масло ТМ-5-18, которое применяется для смазки бортовых редукторов самоходных сельскохозяйственных комбайнов. Степень проскальзывания в ходе испытаний составляла $\lambda = 3 \%$, что соответствует условиям работы зубчатых передач.

В процессе испытаний пар трения на усталость под воздействием контактной нагрузки F_N (задается и регистрируется автоматически) образцуется площадка контакта, максимальные контактные напряжения в центре которой определяют по формуле [13]:

$$\sigma_{z\text{max}} = p_0 = 0,365 n_\sigma [F_N (\Sigma p / \eta)^2]^{1/3}, \quad (1)$$

где n_σ — коэффициент, определяемый по [13]; F_N — контактная нагрузка, Н; Σp — сумма главных кривизн поверхностей соприкасающихся тел в точке первоначального контакта; η — коэффициент, учитывающий упругие характеристики материалов контактирующих тел.

Для заданных размеров испытанных контактных пар получаем

$$\sigma_{z\text{max}} = p_0 = 558,159 (F_N)^{1/3}. \quad (1')$$

Результаты испытаний. Для построения полной кривой контактной усталости в диапазоне циклической долговечности от $N_p > 1$ до $N_p = 10^8$ циклов было испытано 12 контактных пар. Чтобы определить величину F_{lim} (и p_{lim}) при $N_p = 1$ цикл, построили зависимость контактной нагрузки F_N (максимального контактного давления p_0 в центре контактной площадки) от величины сближения осей δ_c образца и контробразца при их статическом деформировании (рисунок 5). В результате был определен уровень контактной нагрузки $F_{\text{lim}} = 1565$ Н ($p_{\text{lim}} = 6500$ МПа), соответствующей принятому предельному состоянию ($\delta_{\text{lim}} = 100$ мкм) для исследуемой контактной пары.

Результаты испытаний представлены на рисунке 6, где изображена полная кривая контактной усталости в координатах контактная нагрузка F_N (или максимальное контактное давление в центре контактной площадки p_0) — число циклов до достижения предельного состояния N_p . Достоинство нагрузочного параметра F_N , в отличие от удельной нагрузки p_0 , состоит в том, что это не расчетная, а физическая величина, задаваемая и измеряемая

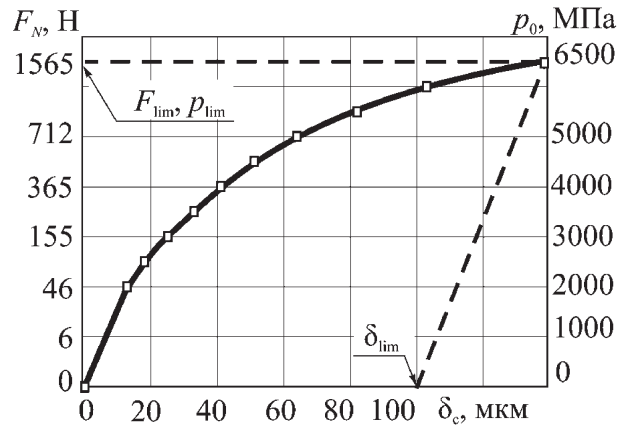


Рисунок 5 — Диаграмма $F_N(p_0) - \delta_c$ при статическом нагружении контактной пары чугуна ВЧГГ (образец) / сталь 18ХГТ (ролик)

при испытаниях, и она остается таковой в любых условиях на контакте (пластический контакт, упруго-пластический контакт, неупругий контакт, квазистатический контакт и др.). А величина p_0 является номинальной, т. е. при ее определении не учитывается остаточная деформация и износ контактирующих поверхностей.

На рисунке 6 отчетливо устанавливаются три характерных участка, как и при механической усталости [3]: I — квазистатическая усталость (область пластического деформирования), II—III — малоцикловая и многоцикловая усталость (области соответственно упругопластического и упругого деформирования), IV — высокоресурсная усталость (область квазиупругого деформирования), представляемые отрезками прямой линии с различным углом наклона к оси абсцисс. Характерно, что участок II—III непрерывен, т. е. не обнаруживается перелома между участками малоцикловой и многоцикловой усталости, в отличие

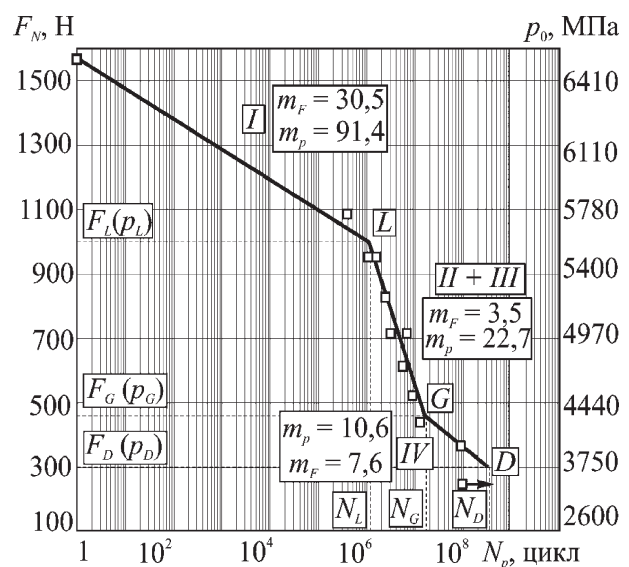


Рисунок 6 — Полная кривая контактной усталости контактной пары «чугун ВЧГГ / сталь 18ХГТ», построенная в координатах контактная нагрузка F_N (наибольшее контактное давление в центре контактной площадки p_0) — число циклов N_p до достижения предельного состояния

от того, как это было установлено при механической усталости [3].

По результатам проведенных экспериментов определены координаты характерных точек: $F_L(p_L)$ – предел квазистатической усталости, $F_G(p_G)$ – предел малоциклового и многоциклового усталости, $F_D(p_D)$ – предел высокоресурсной усталости. Можно видеть, что обнаруженные критические точки перелома характеризуют только переход от одного к другому участку полной кривой контактной усталости в отличие от традиционного (классического) случая построения многоциклового кривой контактной усталости на ограниченной базе.

Исходя из изложенного, по аналогии с [3], можно установить систему параметров сопротивления контактной усталости, определяемых как по нагрузкам, так и по циклической долговечности (таблица 1). Численные значения координат характерных точек кривой контактной усталости L , G , D , показателей наклона левой ветви кривой контактной усталости m_p на каждом из трех участков приведены в таблице 1.

Особый интерес представляет обобщенный анализ показателей наклона на различных участках полной кривой усталости. В таблице 2 собраны показатели наклона для различных условий испытаний материалов разной природы. Видно, что общий диапазон численных значений показателей

наклона весьма велик: от 1,05 до 96,4. При этом наибольшие значения обнаруживаются на участках I (до 96,4) и IV (до 44), а на участках II и III полных кривых усталости они имеют наименьшую величину (от 1,63 до 10,6).

Поскольку участки I–IV полной кривой контактной усталости, построенной в двойных логарифмических координатах, являются прямыми линиями, то их можно описать простейшим степенным уравнением

$$p_0^{m_p} N_p = C_p = \text{const}, \quad (2)$$

со своими (для каждого участка) параметрами m_p и C_p . Найти их нетрудно, если известны координаты точек L , G и D . Аналогичными степенными уравнениями, но только со своими параметрами, описываются полные кривые механической [3] и фрикционной [5] усталости.

В таблице 3 представлены результаты аппроксимации опытных данных уравнением типа (2) с оценкой погрешности.

Видно, что аппроксимация всех участков степенным уравнением (2) правомерна и имеет удовлетворительную погрешность.

По изложенным выше результатам испытаний оказывается возможным построить паспорт работоспособности для контактной пары «чугун ВЧТГ / сталь 18ХГТ» при смазке трансмиссионным мас-

Таблица 1 — Основные характеристики сопротивления контактной усталости контактной пары «чугун ВЧТГ / сталь 18ХГТ»

а) кривая контактной усталости в координатах $F_N - N_p$						
Участок I	Обозначение	$F_L(N_L)$	$m_{R(I)}$	$\Delta F_{(I)}$	$\Delta N_{(I)}$	$\Delta F_{(I)} / \Delta N_{(I)}$
	Численное значение	1000(1,1 · 10 ⁶)	30,5	564	1,1 · 10 ⁶	0,51 · 10 ⁻³
Участок II–III	Обозначение	$F_G(N_G)$	$m_{R(II-III)}$	$\Delta F_{(II-III)}$	$\Delta N_{(II-III)}$	$F_{(II-III)} / \Delta N_{(II-III)}$
	Численное значение	453(1,7 · 10 ⁷)	3,5	547	1,59 · 10 ⁷	0,34 · 10 ⁻⁴
Участок IV	Обозначение	$F_D(N_D)$	$m_{R(IV)}$	$\Delta F_{(IV)}$	$\Delta N_{(IV)}$	$\Delta F_{(IV)} / \Delta N_{(IV)}$
	Численное значение	300(3,3 · 10 ⁸)	7,6	153	3,13 · 10 ⁸	0,49 · 10 ⁻⁶
б) кривая контактной усталости в координатах $p_0 - N_p$						
Участок I	Обозначение	$p_L(N_L)$	$m_{p(I)}$	$\Delta p_{(I)}$	$\Delta N_{(I)}$	$\Delta p_{(I)} / \Delta N_{(I)}$
	Численное значение	5600(1,1 · 10 ⁶)	91,4	900	1,1 · 10 ⁶	0,82 · 10 ⁻³
Участок II–III	Обозначение	$p_G(N_G)$	$m_{p(II-III)}$	$\Delta p_{(II-III)}$	$\Delta N_{(II-III)}$	$\Delta N_{(II-III)}$
	Численное значение	4300(1,7 · 10 ⁷)	10,6	1300	1,59 · 10 ⁷	0,82 · 10 ⁻⁴
Участок IV	Обозначение	$p_D(N_D)$	$m_{p(IV)}$	$\Delta p_{(IV)}$	$\Delta N_{(IV)}$	$\Delta p_{(IV)} / \Delta N_{(IV)}$
	Численное значение	3750(3,3 · 10 ⁸)	22,7	550	3,13 · 10 ⁸	0,18 · 10 ⁻⁵

лом ТМ-5-18. Такой паспорт строится в координатах $\delta_c - N_p$ по величине контактной нагрузки (рисунок 7). Здесь оказывается оцененной работоспособность исследованной пары в любом диапазоне возможного изменения трех определяющих параметров (p_0 (F_N), δ_c , N_p). Так, если задано $p_0 = 4500$ МПа, то можно определить, что данная пара может иметь наибольшую циклическую долговечность $N_p \sim 8 \cdot 10^6$ циклов, когда $\delta_c = \delta_{lim} = 100$ мкм. Если, однако, принять (для иных условий эксплуатации) $\delta_c = \delta_{lim} = 50$ мкм, то максимально возможная циклическая долговечность при той же

нагрузке снижается до $N_p \sim 2 \cdot 10^6$ циклов (т. е. в 4 раза). А если контактную нагрузку уменьшить до $p_0 = 4000$ МПа, то циклическая долговечность будет $N_p \sim 8 \cdot 10^7$ циклов при $\delta_c = 100$ мкм и $N_p \sim 6,5 \cdot 10^7$ циклов при $\delta_c = 50$ мкм (т. е. меньше в 1,2 раза).

Заметим, что имея паспорт, представленный на рисунке 7, можно оценивать и среднюю скорость накопления повреждений

$$v_\delta = \Delta\delta_{lim} / \Delta N_p \text{ (мкм/цикл)}.$$

Численные значения этой скорости приведены в таблице 4.

Таблица 2 — Анализ значений показателя наклона кривых механической, фрикционной и контактной усталости

Объекты и условия их испытания	Численное значение показателя m_j ($j = p, F$)			
	I (квазистатическая усталость)	II (малоцикловая усталость)	III (многоцикловая усталость)	IV (высоко-ресурсная усталость)
Полная кривая механической усталости (сталь 25ХГТ) [3] m_σ	96,4	5,9	7,7	44,0
Полная кривая фрикционной усталости (сталь 45 / полимер Ф4-ВМ) [5] m_F	13,11	1,63		1,05
Полная кривая контактной усталости (чугун ВЧТГ / сталь 18ХГТ) m_p m_F	91,4	10,6		22,7
	30,5	3,5		7,6

Таблица 3 — Погрешность аппроксимации опытных данных уравнением типа (2)

Участки	Уравнение типа (1)	p , МПа	$N_p^{(расч)}$, цикл	$N_p^{(эксп)}$, цикл	Погрешность ΔN_p , %
Участок I	$N_p = 1,1 \cdot 10^6 \left(\frac{5600}{p_0} \right)^{91,4}$	6000	1,34	1	—34
		5750	98206	$4 \cdot 10^5$	75
Участок II—III	$N_p = 1,7 \cdot 10^7 \left(\frac{4300}{p_0} \right)^{10,6}$	5500	1251325	$1,1 \cdot 10^6$	—14
		5500	1251325	$1,63 \cdot 10^6$	23
		5250	2048924	$2,48 \cdot 10^6$	17
		5000	3436628	$6,9 \cdot 10^6$	50
		5000	3436628	$3,2 \cdot 10^6$	—7
		4750	5919190	$5,68 \cdot 10^6$	—4
		4500	10499338	$8,7 \cdot 10^6$	—21
		4500	10499338	$9,1 \cdot 10^6$	—15
Участок IV	$N_p = 3,3 \cdot 10^8 \left(\frac{3750}{p_0} \right)^{22,7}$	4500	5261380	$8,7 \cdot 10^6$	40
		4500	5261380	$9,1 \cdot 10^6$	42
		4250	19257283	$1,32 \cdot 10^7$	—46
		4000	76253874	$9,2 \cdot 10^7$	17

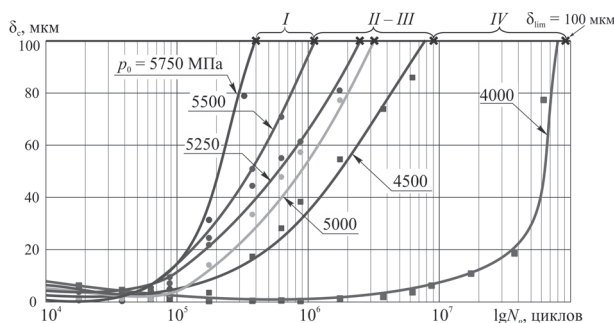


Рисунок 7 — Паспорт работоспособности для контактной пары «чугун ВЧТГ / сталь 18ХГТ» при смазке трансмиссионным маслом ТМ-5-18

Таблица 4 — Средняя скорость накопления повреждений для контактной пары «чугун ВЧТГ / сталь 18ХГТ» при смазке трансмиссионным маслом ТМ-5-18

p_0 , МПа	5750	5500	5250	5000	4500	4000
v_0 , мкм/цикл	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$8,5 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$9,8 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$

Как видно из этой таблицы, с увеличением контактного давления скорость накопления повреждений для контактной пары «чугун ВЧТГ / сталь 18ХГТ» при смазке трансмиссионным маслом ТМ-5-18 может изменяться от $1,5 \cdot 10^{-6}$ до $3,1 \cdot 10^{-4}$.

Заключение

1. Для построения полной кривой контактной усталости предложена и обоснована величина обобщенного критерия достижения предельного состояния при контактной усталости в виде критической величины $\delta_c = \delta_{lim}$. Установлено, что в первом приближении для материалов зубчатых колес значение этой величины составляет $\delta_{lim} \sim 100$ мкм. В других условиях испытаний может быть принята и другая (обоснованная) величина δ_{lim} .

2. Разработана методика и впервые выполнено экспериментальное построение полной кривой контактной усталости в диапазоне циклической долговечности от $N_p = 1$ до 10^8 циклов по принятому критерию предельного состояния ($\delta_{lim} \sim 100$ мкм) по результатам испытаний контактной пары «высокопрочный чугун ВЧТГ / сталь 18ХГТ».

3. Установлены следующие основные закономерности сопротивления контактной усталости: в широком диапазоне изменения циклической долговечности и нагрузки обнаруживаются 3 характерных участка — области I (квазистатической), II–III (малоцикловой и многоцикловой) и IV (высокоресурсной) усталости. Экспериментальные данные на каждом из этих участков описываются степенным уравнением (2) одного вида, но с различными по величине определяющими параметрами (см. таблицу 1).

4. Экспериментально установлены основные характеристики сопротивления контактной усталости пары «чугун ВЧТГ (образец) / сталь 18ХГТ (контробразец)» (см. рисунок 6 и таблицу 1).

5. Показано, что аппроксимация всех участков полной кривой контактной усталости степенным уравнением (2) правомерна и имеет удовлетворительную погрешность (см. таблицу 3).

6. Построен паспорт работоспособности (по трем характеристикам — p_0 , δ_c , N_p) для контактной пары «чугун ВЧТГ / сталь 18ХГТ» при смазке трансмиссионным маслом ТМ-5-18.

Список литературы

1. Трошенко, В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справ. в 2-х т. / В.Т. Трошенко, Л.А. Сосновский. — Киев: Наук. думка, 1987. — Т. 1. — 510 с. — Т. 2. — 825 с.
2. Сосновский, Л.А. О полной кривой усталости / Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 1995. — № 5. — С. 33–34.
3. Сосновский, Л.А. О полной кривой усталости / Л.А. Сосновский, С.А. Тюрин, Е.С. Таранова // Механика машин, механизмов и материалов. — 2012. — № 2(19). — С. 41–49.
4. Махутов, Н.А. О построении кривой фрикционной усталости / Н.А. Махутов, Л.А. Сосновский, А.В. Марченко // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 1998. — № 12. — С. 36–39.
5. Сосновский, Л.А. Фрикционная усталость полимера при трении по стали / Л.А. Сосновский, А.В. Марченко // Проблемы прочности. — 2001. — № 1. — С. 48–61.
6. Колеса зубчатые. Виды повреждений. Классификация и описание: ГОСТ 31381-2009. — Введ. 01.01.10. — Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2009. — 65 с.
7. Трубин, Г.К. Контактная усталость материалов для зубчатых колес / Г.К. Трубин. — М.: «Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы», 1962. — 404 с.
8. Вильчек, А.И. Исследование контактной выносливости комплекснолегированных теплостойких сталей / А.И. Вильчек, М.В. Сидоренко, Б.Н. Кутепов // Вестник СевГТУ. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010. — Вып. 110: Механика, энергетика, экология. — С. 204–207.
9. Петрусевиц, А.И. Контактная прочность деталей машин / А.И. Петрусевиц. — М.: Машиностроение, 1969. — 64 с.
10. Орлов А.В. Испытание конструкционных материалов на контактную усталость / А.В. Орлов, О.Н. Черменский, В.М. Нестеров. — М.: Машиностроение, 1980. — 10 с.
11. Колесников, Ю.В. Механика контактного разрушения / Ю.В. Колесников, Е.М. Морозов. — М.: Наука, 1989. — 219 с.
12. Пинегин, С.В. Контактная прочность и сопротивление качению. — М.: Машиностроение, 1969. — 234 с.
13. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытаний на контактную усталость: Р 50-54-30-87. — Введ. 01.01.88. — М.: Изд-во стандартов, 1987. — 93 с.
14. Бернштейн, М.Л. Металловедение и термическая обработка стали: справ. / М.Л. Бернштейн. — 4-е изд. — М.: Металлургия. — Т. 1. — 1991. — 462 с.
15. Лахтин, Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов: учеб. для студентов металлургических специальностей вузов / Ю.М. Лахтин. — 3-е изд. — М.: Металлургия. — 1983. — 360 с.
16. Саверин, М.М. Контактная прочность материалов. — М.: Л.: Машгиз, 1946. — 148 с.
17. Трибофатика. Методы износоустойчивых испытаний. Испытания на контактно-механическую усталость: ГОСТ 30754-2001. — Введ. 01.07.02. — Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2002. — 32 с.
18. Павлов, З.П. Выносливость рабочих поверхностей зубьев при переменной нагрузке / З.П. Павлов // Вестник машиностроения. — № 3. — 1953.
19. 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.
20. Белянин, А.И. Исследование факторов, влияющих на нагрузочную способность зубчатых передач / А.И. Белянин. — ЛКВВИА им. Можайского. — Л. 1957.

21. Мурашко, В.П. Контактная выносливость тяжело нагруженных зубчатых колес при ступенчатом режиме нагружения / В.П. Мурашко, К.И. Заблонский. — Одесса: Изд. ОПИ. — Вып. 3. — 1959.
22. Kalkert, W.T. Lebens dauer-versuchungen an breiten ungehearteter Zahnradern / W.T. Kalkert. — Industrie Anzeigen. — № 19, III. — 1961.
23. Трибофатика. Машины для износоустойчивых испытаний. Общие технические требования: ГОСТ 30755-2001. — Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2002. — 8 с.
24. СТБ 1758-2007. Трибофатика. Метод совмещенных испытаний на изгибную и контактную усталость материалов зубчатых колес (Стандарт Беларуси): СТБ 1758-2007. — Минск: ГОССТАНДАРТ, 2007. — 45 с.
25. Метод совмещенных усталостных испытаний моделей зубчатых зацеплений / Н.А. Махутов [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2005. — Т. 71, № 1. — С. 55–57.
26. Методология определения критериев предельных состояний высоконагруженных зубчатых передач трансмиссий и приводов / Е.И. Тескер [и др.] // Вестник машиностроения. — 2008. — № 2. — С. 12–17.
27. Заблонский, К.И. Об установлении единого критерия контактной усталости рабочих поверхностей зубьев / К.И. Заблонский, Д.Л. Семенов // Известия вузов. Машиностроение. — 1966. — № 11. — С. 35–43.
28. Семенов, Д.Л. Влияние степени повреждения активных поверхностей зубьев выкрашиванием на параметры кривых контактной усталости / Д.Л. Семёнов. — Вып. 50. — Киев: Техника, 1990.
29. Комиссаров, В.В. О систематизации критериев надежности зубчатых передач / В.В. Комиссаров // Проблемы безопасности на трансп.: тез. докл. IV Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 1–2 окт. 2007 г. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, БелЖД, Белорус. гос. ун-т трансп.; редкол.: В. И. Сенько (отв. ред.) [и др.]. — Гомель, 2007. — С. 71–72.
30. Машин, Ю.В. Предупреждение питтинга крупномодульных передач путем корректировки рабочих поверхностей зубьев в условиях эксплуатации: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.02 / Ю.В. Машин; Белор. госуд. ун-т. — Могилев, 2008 г. — 24 с.

Sosnovskiy L.A., Komissarov V.V., Taranova E.S., Tyurin S.A.

Experimental construction of full rolling fatigue curve of couple high-strength cast «iron VCHTG / steel 18HGT» and its analysis

Experimental creation of full rolling fatigue curve in the range of durability from $N_p = 1$ (static loading) to 10^8 cycles on the basis of integrated criterion of achievement of a limit state (rapprochement of axes of a specimen and counter specimen $\delta_c = \delta_{lim} \sim 100$ microns) is executed at test of the contact pair high-strength cast «iron VCHTG / steel 18HGT». The basic patterns and obtain the basic characteristics of rolling fatigue resistance. The passport of operability of studied pair is offered and constructed.

Keywords: rolling fatigue, contact pair, full rolling fatigue curve, criterion of limit state, rapprochement of axes, pitting

Поступила в редакцию 21.08.2013.