

## Контактная задача механики разрушения трибосопряжений при сложном термомеханическом нагружении

Л. И. ИВЩЕНКО, В. В. ЦЫГАНОВ

Запорожский национальный технический университет

Рассмотрена механика контактного разрушения сопряжений при трении в условиях сложного термодинамического нагружения. Показана возможность математического описания комплексного повреждения узлов трения, интенсивности изнашивания с учетом особенностей формирования поверхностного слоя при контактировании. Представлена методика расчета поверхностной прочности и долговечности трибосопряжений.

Розглянута механіка контактного руйнування сполучень при терті в умовах складного термодинамічного навантаження. Показана можливість математичного опису комплексного пошкодження вузлів тертя, інтенсивності зношування з урахуванням особливостей формування поверхневого шару при контакті. Представлена методика розрахунку поверхневої міцності і довговічності трибоз'єднань.

Mechanics of contact destruction of joints is considered at a friction in the conditions of difficult thermodynamics loading. Possibility of mathematical description of complex damage of knots of friction is rotined, intensities of wear taking into account the features of forming of superficial layer at a contact. The method of calculation of superficial durability and longevity of tribojoints is presented.

**Введение.** В настоящее время результаты исследований в области изнашивания материалов в особо тяжелых условиях механической и тепловой нагрузок, которые носят динамический характер, не позволяют с высокой степенью достоверности выбрать (или разработать) те или иные конструктивно-технологические мероприятия, которые направлены на повышение долговечности изделий. Вызвано это, прежде всего условиями проведения исследований, которые часто не соответствуют реальным условиям эксплуатации трибоузлов, поскольку большая часть деталей трибосопряжений работает в условиях сложного динамического нагружения связанного с вибрациями, действующими в разных направлениях, что влияет на нестойкие синергетические процессы. Процессы трения и изнашивания, а также разрушение поверхностных слоев трибосопряжений определяется динамическим характером приложения нагрузок в контакте, амплитудами взаимных перемещений, создающими специфические условия контактного взаимодействия. При этом большая часть трибосопряжений работают в условиях сложного трехмерного динамического нагружения: удар и проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях с воздействием как высоких, так и низких температур. Такой комплекс условий нагружения вызывает сложное напряженное состояние поверхностных слоев контактирующих пар. Этим объясняется ограниченные возможности общих положений теории трения, а также большинства результатов экспериментальных исследований.

**Постановка задачи.** Решение контактной задачи механики разрушения трибосопряжений, которые эксплуатируются в условиях сложного термомеханического нагружения, возможно в рамках трибофатики на основании модели учета взаимного влияния процессов механического (объемного) разрушения и фрикционной усталости.

Очевидно, что при контактных условиях нагружения приповерхностные слои материала повреждаются сильнее, чем глубинные. При многократном нагружении усталостные микротрещины возникают на поверхности даже при отсутствии контактных нагрузок и располагаются в активных плоскостях скольжения, в которых дей-

ствуют максимальные сдвиговые напряжения [1]. Можно выделить четыре последовательные стадии процессов в материале в соответствии с особенностями деформирования и разрушения материалов при усталости: упрочнение материала из-за роста плотности дислокаций в локальных объемах до критического значения; зарождение и развитие субмикроскопических трещин; развитие микротрещин до размеров макротрещин; развитие и слияние макротрещин до выкрашивания элементов поверхности.

Накопление дефектов, приводящее к образованию микротрещины, определяется характерными особенностями основных структурных элементов материала. Под действием многократных импульсных нагрузок исходная структура деформируемого материала существенно изменяется. Подповерхностная зона (глубиной от нескольких единиц до сотен микрометров) представляет собой пластически деформированный слой материала с определенной величиной и ориентацией кристаллитов.

Соотношение механических свойств и параметров структуры, приведенное в работе [2], показывает, что сопротивление хрупкому разрушению зависит не только от размера зерна, но и от размера блока мозаики. Причем, размер зерна не определяет однозначно механические свойства металла. Напряжение течения линейно зависит от размера субзерен – элемента субструктуры. Сделан вывод об определяющем влиянии степени разориентации на сопротивление разрушению металла.

**Результаты работы.** Как показали предварительно проведенные исследования [3], сложное трехмерное нагружение (удар и проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях), создает условия для формирования фрагментов поверхностного слоя с относительно легким прохождением дислокаций через данные кристаллиты к их границам. Это способствует снижению уровня внешних напряжений, необходимых для действия механизма ротационной пластичности в анализируемых структурах. В результате образуется поверхностный слой с более равномерной текстурой, что сопровождается повы-

шенным износом. Изменение характера нагружения приводит к изменению состояния поверхностного слоя и, как следствие, изменению износостойкости трибосопряжения.

Исследования с помощью электронного микроскопа позволили установить, что в результате пластической деформации в поверхностных слоях формируется развитая ячеистая структура, ориентированная вдоль направления трения [4]. Разрушение инициируется гранями ячеек, перпендикулярными направлению скольжения, а первоначальная трещина проходит вдоль этих граней. Поэтому при относительном скольжении поверхностей возможно зарождение различно ориентированных трещин. Особенно в случае трения с проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

В общем случае образование и рост микротрещин при циклическом нагружении существенно зависит как от структурного состояния материала, так и от числа циклов нагружения  $N$ . Для описания развития микроструктурно коротких трещин применимо уравнение, представленное в работе [5]:

$$\frac{db}{dN} = C(\Delta\gamma)^m(d-b) \quad (1)$$

где  $b$  – глубина трещины;  $\Delta\gamma$  – размах деформации сдвига;  $d$  – характерный размер элемента структуры;  $C$  и  $m$  – экспериментально определяемые константы материала.

Из этого уравнения следует, что по мере увеличения трещины до размера зерна ее скорость уменьшается вплоть до нуля. При напряжениях выше предела выносливости трещина не останавливается, а только замедляет свой рост или может остановиться на какое-то время.

Причем, характер накопления деформаций при действии многократных импульсных и пульсирующих нагрузок примерно одинаков [6]. Так, при ударном нагружении зависимость контактной деформации от числа циклов носит нелинейный характер с тремя участками: на первом участке – стадии упрочнения (примерно до  $N =$

20) происходит контактная деформация; на втором участке замедленное накопление контактной деформации с приблизительно постоянной скоростью (до  $N = 10^3 \dots 10^4$ ); на третьем участке наблюдается значительный рост деформации и интенсивное разрушение поверхности.

Установлено [1], что износ при ударном нагружении является нелинейной функцией от числа циклов и нормального напряжения:

$$W = BN^n \sigma^m \quad (2)$$

где  $B, n, m$  – коэффициенты.

При этом нормальное напряжение  $\sigma$  и максимальное контактное давление определяются силой удара, которая в свою очередь зависит от скорости, геометрии контакта и свойств материала.

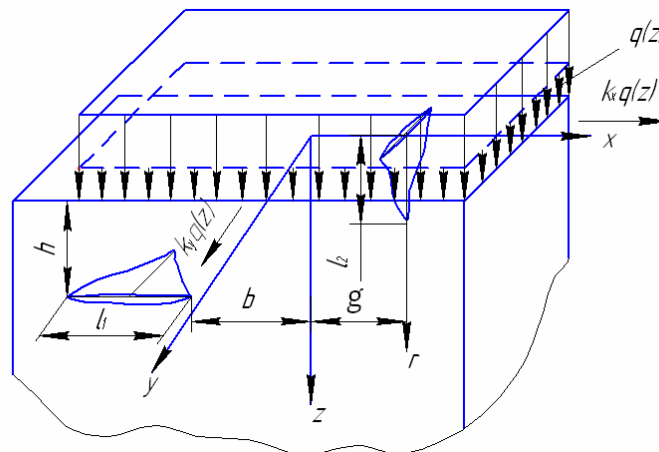
Циклические напряжения приводят к возникновению усталостного повреждения как на поверхности, так и на некоторой глубине. Явление поверхностной усталости является следствием нормальных столкновений микронеровностей, которые приводят к возникновению под неровностями касательных напряжений, действующих на глубине порядка высот выступов (микрометры). Под выступом действует максимальное касательное напряжение:

$$\tau'_m = (E' / \pi^2) \phi \quad (3)$$

где  $E'$  – приведенный модуль упругости;  $\phi$  – угловой коэффициент выступа.

Очевидно, что микроскопические (второго рода) максимальные касательные напряжения действительно могут быть причиной образования зародышевых трещин под поверхностью.

Общий случай расчетной схемы вертикальных поверхностных и горизонтальных подповерхностных трещин при трении с трехмерным динамическим нагружением приведен на *рис. 1*.



*Рис. 1.* Схема расположений горизонтальной и вертикальной трещин при трении с трехмерным динамическим нагружением

Поверхность нагружена нормальным переменным напряжением  $q(z)$  при воздействии ударного нагружения и тангенциальными напряжениями  $\tau_x$  и  $\tau_y$  при возвратно поступательном проскальзывании в двух взаимно перпендикулярных направлениях контробразца. Учитывая вероятность существенного влияния скорости перемещения на

величину коэффициента трения, площадка контакта между двумя телами определяется условиями:

$$\begin{cases} \tau_{xy} = -q(z)\sqrt{k_x^2 + k_y^2} + (E'_m / \pi^2) \phi \\ \sigma_z = -q(z) \end{cases} \quad (4)$$

где  $k_x$  и  $k_y$  – коэффициенты трения по оси  $x$  и  $y$ .

Материал в поверхностном слое можно рассматривать в первом приближении как упругий. В случае хрупкого разрушения необходимым и достаточным является силовой критерий – коэффициент интенсивности напряжений  $K$ , который количественно характеризует поле напряжений у вершины трещины. Когда расчетный коэффициент  $K$  достигнет своего критического значения трещина начнет распространяться. Согласно ГОСТ 25.506-85 линейная упругая механика разрушения и силовой критерий разрушения, разработанные для хрупких тел, применимы, если размер зоны пластичности не превышает  $1/10$  толщины образца.

Поэтому для рассматриваемого случая коэффициенты интенсивности напряжений определяются [6]:

$$\begin{cases} \text{для горизонтальной трещины} \\ K_{I(-b-l_1)} = \lim_{x \rightarrow (-b-l_1)} \sqrt{2[x - (-b-l_1)]} \sigma_z(x, h) \\ K_{II(-b-l_1)} = \lim_{x \rightarrow (-b-l_1)} \sqrt{2[x - (-b-l_1)]} \tau_{xy}(x, h) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} K_{I(-b)} = \lim_{x \rightarrow (-b)} \sqrt{2[x - (-b)]} \sigma_z(x, h) \\ K_{II(-b)} = \lim_{x \rightarrow (-b)} \sqrt{2[x - (-b)]} \tau_{xy}(x, h) \end{cases} \quad (6)$$

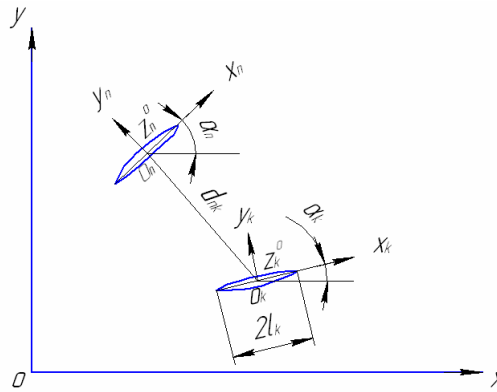


Рис. 2. Схема произвольно ориентированных трещин

Центры трещин определяются координатами

$$z_k^0 = x_k^0 + iy_k^0 \quad (8)$$

где  $i = \sqrt{-1}$  – мнимая единица.

В точках  $O_k$  размещены начала локальных систем координат  $x_k, y_k$ . Оси  $x_k$  совпадают с линиями трещин и образуют углы  $\alpha_k$  с осью  $x$ .

Если ось деформации направлена по оси  $z$  прямоугольной декартовой системы координат, компоненты вектора упругих смещений  $u, v$  и  $\omega$  в таком теле могут быть представлены в виде

$$u = v = 0; \quad \omega = \omega(x, y)$$

Из закона Гука следует, что ненулевые компоненты тензора напряжений  $\tau_{xz}$  и  $\tau_{yz}$  являются функциями двух переменных  $x$  и  $y$  и выражаются через смещение  $\omega(x, y)$  следующим образом:

$$\begin{cases} \tau_{xz} = \mu \frac{d\omega}{dx} \\ \tau_{yz} = \mu \frac{d\omega}{dy} \end{cases} \quad (9)$$

где  $\mu$  – модуль сдвига.

для вертикальной

$$\begin{cases} K_{I(l_2)} = \lim_{z \rightarrow l_2} \sqrt{2(z-l_2)} \sigma_x(g, z) \\ K_{II(l_2)} = \lim_{z \rightarrow l_2} \sqrt{2(z-l_2)} \tau_{xy}(g, z) \end{cases} \quad (7)$$

С помощью аппарата сингулярных интегральных уравнений возможно решение задачи об упругом и предельном равновесии плоских пластин, ослабленных системой произвольно ориентированных прямолинейных трещин продольного сдвига, т.е. определения напряженно-деформированного состояния поверхностей при трении. В случае наличия  $N$  прямолинейных трещин длиной  $2l_k$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) в образце, отнесенном к системе  $(x, y, z)$  с осью антиплоской деформации направленной вдоль оси  $z$ , получаем схему расположения трещин, представленной на рис. 2.

Система уравнений равновесия сводится к одному уравнению, которое в случае отсутствия массовых сил принимает форму

$$\frac{d\tau_{xz}}{dx} + \frac{d\tau_{yz}}{dy} = \mu \left( \frac{d^2\omega}{dx^2} + \frac{d^2\omega}{dy^2} \right) = 0 \quad (10)$$

Примем, что

$$\tau_{xz} - i\tau_{yz} = F(z)$$

где  $F(z)$  – аналитическая функция или функция напряжений, которая характеризует напряженное состояние тела, вызванное разрывами смещений  $\mu_k(x_k)$  на  $N$  трещинах.

Тогда для системы произвольно ориентированных прямолинейных трещин продольного сдвига функция напряжений принимает вид [7]:

$$F(z) = \frac{1}{\pi i} \sum_{k=1}^N \int_{-l_k}^{l_k} \mu'_k(t) \left( \frac{1}{te^{i\alpha_k} - z + z_k^0} - \frac{1}{te^{-i\alpha_k} - z + z_k^{-0}} \right) dt$$

На основании напряжений в плоскостях трещин и заданной нагрузки  $\tau_k(x_k)$  получим систему  $N$  сингулярных интегральных уравнений рассматриваемой задачи для определения неизвестных функций  $\mu_k(x)$ :

$$\int_{-l_n}^{l_n} \frac{\mu'_n(t)dt}{t-x} + \sum_{k=1}^N \int_{-l_k}^{l_k} Q_{nk}(t,x)\mu'_k(t)dt = \pi\tau_n(x) \quad (12)$$

$$(n = 1, 2, 3, \dots, N), |x| < l_n$$

где ядра  $Q_{nk}(t,x)$  определяются соотношением

$$Q_{nk}(t,x) = (1 - \delta_{nk})P_{nk}(t,x) + \operatorname{Re} \left\{ \frac{e^{i\alpha_n}}{x_n - \bar{T}_k} \right\} \quad (13)$$

где  $\delta_{nk}$  – символ Кронекера,  $t$  – точки рассматриваемого контура, а величины  $P_{nk}(t,x)$ ;  $X_n$  и  $T_k$  находятся на основании равенств:

$$P_{nk}(t,x) = \operatorname{Re} \frac{e^{i\alpha_n}}{T_k - X_n} \quad (14)$$

$$T_k = te^{i\alpha_k} + z_k^0 \quad (15)$$

$$z_k = e^{-i\alpha_k} (z - z_k^0) \quad (16)$$

$$X_n = xe^{i\alpha_n} + z_n^0 \quad (17)$$

В случае необходимости решения задачи о распределении температурного поля в теле с системой произвольно ориентированных прямолинейных трещин будем считать, что температура тела не зависит от координаты  $z$ . Тогда в теле имеется плоское температурное поле  $T(x, y)$ , которое будет удовлетворять уравнению Лапласа:

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} = 0 \quad (18)$$

При этом функция  $T(x, y)$  должна удовлетворять трем видам граничных условий когда: на поверхности тела известна температура, известна плотность теплового потока и известна температура окружающей среды. Граничное условие третьего рода выражается в виде:

$$\frac{dT}{dn} + nT = nT_c \quad (19)$$

где  $n$  – внешняя нормаль к исследуемой области;  $N$  – коэффициент теплообмена;  $T_c$  – температура окружающей среды, теплообмен с которой совершается по закону Ньютона.

Тогда функция напряжений принимает вид [7]:

$$F(z) = \frac{1}{\pi i} \sum_{k=1}^N \int_{-l_k}^{l_k} \gamma'_k(t) \left( \frac{1}{T_k - z} - \frac{1}{\bar{T}_k - z} \right) dt \quad (20)$$

а система  $N$  сингулярных интегральных уравнений относительно неизвестной функции  $\gamma'_k(x)$ :

$$\int_{-l_n}^{l_n} \frac{\gamma'_n(t)dt}{t-x} + \sum_{k=1}^N \int_{-l_k}^{l_k} \gamma'_k(t)Q_{nk}(t,x)dt = \pi q_n(x) \quad (21)$$

$$|x| < l_n \quad (n = 1, 2, \dots, N)$$

Здесь

$$Q_{nk}(t,x) = \operatorname{Re} e^{i\alpha_n} \left\{ \frac{1 - \delta_{nk}}{T_k - X_n} - \frac{1}{\bar{T}_k - X_n} - \frac{\exp[is(\bar{T}_k - X_n)]}{-2bi \int_0^\infty \frac{ds}{as + b}} \right\} \quad (22)$$

Практическое применение предложенной методики моделирования зарождения, развития системы трещин и процессов контактного разрушения поверхностей при трении в условиях сложного термомеханического нагружения рассмотрим на примере модели учета взаимного влияния процессов механического (объемного) разрушения и фрикционной усталости в случае наличия в зоне контакта свободных макрорадикалов.

В настоящее время перспективным направлением регулирования величины разрушения деталей трибосопряжений является внедрение оптимальных условий воздействия на поверхностный слой металла свободных макрорадикалов, которые образуются при деструкции полимера. В частности, определенную аналогию износу трущихся тел представляет процесс разрушения обрабатываемого металла при резании с существенным влиянием свойств поверхностного слоя. Явления, наблюдающиеся при износе деталей машин, имеют место и при резании металлов. Деструктируемые полимеры активизируют разрушение обрабатываемого материала аналогично низкомолекулярным поверхностно активным веществам [8].

Для разработки модели целесообразно использовать современную трактовку гипотезы слабого звена с применением концепции опасного объема для объемной усталости и опасной площади для изнашивания, термофлуктуационной теории прочности. Функция вероятности отказов силовой системы за установленный срок службы имеет вид [9]:

$$P(\sigma, q) = a_c \left\{ 1 - \exp \left[ -C_v \left( V_{p_y} / V_o \right) \left( T_M / T_o \right)^{m_T} (\sigma - \sigma_{v_{min}}) \sigma_w^{m_v} - \left[ -C_s \left( S_q / S_o \right) q_1^1 T_p \right]^{m_s} / (q_d - q)^{m_s} \right] \right\}$$

где  $a_c$  – эмпирический коэффициент, учитывающий статическую взаимосвязь событий повреждения при одновременном действии циклических напряжений  $\sigma$  и контактного давления  $q$ ;  $C_v$  и  $C_s$  – коэффициенты, определяющие схему усталостных испытаний и контактного нагружения;  $V_{p_y} / V_o$  – относительный опасный объем

циклически деформируемого тела (вероятностный критерий подобия усталостного разрушения по сравнению с некоторым стандартным объемом  $V_o$ );  $S_q / S_o$  – относительный опасный объем, интенсивно деформируемый при трении тела (прилежащий к площади контактирования);  $T_M$  и  $T_p$  – температура металла и полимера в зоне контакта в процессе трения и циклического нагружения (модель построена для металл-полимерной пары трения);  $T_o$  – начальная температура в зоне трения;  $m_T$  – параметр температурной активации процессов усталостного повреждения металла;  $\sigma_{v_{min}}$ ,  $\sigma_w$ ,  $m_v$  – параметры функции распределения пределов выносливости  $\sigma_v$  в форме закона Вейбула;  $q_1^1 = k / \gamma_q$  – единичное термофлуктуационное напряжение соответствующее изменению температуры полимера на 1 К ( $\gamma_q$  – структурно чувствительный коэффициент,  $k$  – коэффициент Больцмана);  $q_d = U_o / \gamma_q$  – предел деструкции полимера ( $U_o$  – начальная энергия активации процесса разрушения – энергия разрыва межатомной связи).

Графической интерпретацией модели фрикционной усталости может являться функция плотности вероятности отказов, которую при сложном динамическом нагружении необходимо строить в нескольких координатах. В качестве примера на рисунке 3 представлено распределение плотности вероятности отказов трибосопряжения комбинированного процесса при трении образцов сплава ХН77ТЮР. Исходными данными для расчета послужили результаты соответствующих испытаний износостойкости этого сплава, представленные в работе [10].

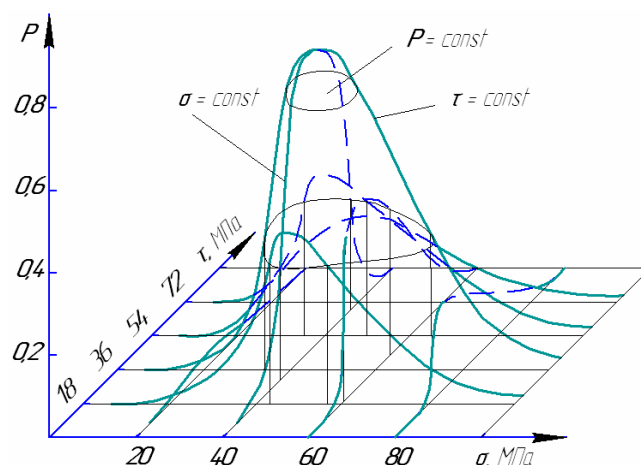


Рис. 3. Распределение плотности вероятности отказов трибосопряжения сплава ХН77ТЮР

Отмечается прямой и обратный эффекты взаимовлияния двух процессов: прямой эффект – изменение характеристик сопротивления усталостному разрушению из-за влияния процессов изнашивания; обратный эффект – интенсификация процесса изнашивания обоих элементов силовой системы, обусловленная циклическими деформациями одного из них. Для оценки долговечности трибосопряжений предлагается использовать деформационно-кинетический критерий малоциклового усталости [9]:

$$\int_0^{N_f} \frac{dN}{N_f(t, T)} + \int_0^{e_f} \frac{de}{\varepsilon_f(t, T)} + \int_0^{\Omega} \frac{d\omega^*}{\Omega_w(t, T)} = D \quad (24)$$

где  $N$  – число циклов нагружения;  $N_f$  – число циклов до разрушения;  $t$  – время эксплуатации узла трения;  $T$  – температура;  $e$  – односторонне накопленная в процессе пластического нагружения деформация;  $\varepsilon_f$  – односторонне накопленная в процессе пластического нагружения деформация в момент разрушения;  $\omega^*$  – удельная работа разрушения единицы объема материала;  $\Omega$  – плотность энергии;  $\Omega_w$  – отношение всей выделившейся энергии за ресурс к объему слоя материала, износ которого допустим;  $D = 0,2 \dots 5$  – константа.

### Выводы

Представленные модели подтверждают актуальность математического описания комплексного повреждения узлов трения. Оценка механики контактного разрушения должна производиться на основе изучения поведения поверхностных слоев материалов в связи с особенностями термомеханического нагружения трибосопряжения в реальных условиях эксплуатации. В свою очередь развитие методов расчета оценки поверхностной прочности является необходимой предпосылкой разработки более износостойких трибузлов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Морозов Е. М. Контактные задачи механики разрушения / Е. М. Морозов, М. В. Зернин. — М. : Машиностроение, 1999. — 544 с.
2. Рыбакова Л. М. Структура и износостойкость металла / Л. М. Рыбакова, Л. И. Куксенова. — М. : Машиностроение, 1982. — 212 с.
3. Ивченко Л. И. Особенности изнашивания трибосопряжений в условиях трехмерного нагружения / Л. И. Ивченко, В. В. Цыганов, И. М. Закиев // Трение и износ. — 2011. — Том 32, № 1. С. 500—509.
4. Гарбар И. И. Образование продуктов изнашивания при трении скольжения / И. И. Гарбар, В. П. Северденко, Ю. Н. Скорьнин // ДАН СССР. — 1975. — Т. 225, № 3. — С. 82—85.
5. Miller K. J. The behaviour of shot fatigue cracks and their initiation / K. J. Miller // Fatigue on Eng. Mat. and Struct. Part 1. A review of the two recent books. — 1987. — Vol. 10, N 3. — P. 75—91.
6. Колесников Ю. В. Механика контактного разрушения / Ю. В. Колесников, Е. М. Морозов. — М. : Наука, 1988. — 224 с.
7. Панасюк В. В. Распределение напряжений около трещин в пластиках и оболочках / В. В. Панасюк, М. П. Саврук, А. П. Дацшин. — К. : Наукова думка, 1976. — 444 с.
8. Цыганов В. В. Трибодиагностика эффективности обработки металлов резанием на примере использования гранульного абразивного материала / В. В. Цыганов // Вісник КрНУ ім. М. Остроградського. — 2011. — Вып. 4, Ч. 1. — С. 63—66.
9. Сосновский Л. А. Контактнo-механическая усталость: основные закономерности (обобщающая статья) / Л. А. Сосновский, Н. А. Махугов, В. А. Шуринов // Заводская лаборатория. — 1992. — № 11. — С. 44—61.
10. Ивченко Л. И. Процессы контактного взаимодействия в трибосопряжениях и износостойкость жаропрочных материалов в экстремальных условиях: дис. д-ра. техн. наук: 05.02.04. / Ивченко Леонид Иосифович. — Хмельницкий, 1999. — 381 с.