



УДК 621.791

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ВЫНОСЛИВОСТИ НАПЛАВОЧНЫХ
МАТЕРИАЛОВ***Колотиенко С. Д., Журавлев А. В.,
Рощина Е. В.*

Донской государственный технический
университет, Ростов-на-Дону, Российская
Федерация

prepodtkm@donstu.ruawj2001@Yandex.ruev_roschina@mail.ru

Рассмотрено влияние различных факторов на интенсивность изнашивания наплавочных материалов. Анализ проводился по двум основным направлениям: изучение кинетики процессов изнашивания, влияние условий фрикционного контакта на износостойкость и определение механизма изнашивания материалов для тяжелых условий фрикционного контакта. Исследовалось поведение наплавочных материалов при скольжении о пластически деформируемый металл, в том числе при высоких (до 850–960°C) температурах, при качении в области упругого контакта и при качении о пластически деформируемый металл, при пульсирующем взаимодействии в упругой и пластической области, в том числе при динамическом характере контактного нагружения и высоких температурах.

Результаты исследования моделей контактных повреждений наплавочных материалов показывают принципиальную возможность определения их износостойкости в зависимости от скорости усталостного развития микротрещин и длительности процесса разрушения поверхностного слоя. Предложено определять параметры контактной трещиностойкости исходя из геометрических характеристик очагов контактного разрушения и длительности процесса их образования. Разработан комплекс, состоящий из машины трения, оснащенной специальным датчиком, который

UDC 621.791

**COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL
METHODS FOR PREDICTING THE
ENDURANCE OF SURFACING
MATERIALS***Kolotienko S. D., Zhuravlev A. V.,
Roshchina E. V.*

Don State Technical University, Rostov-on-Don,
Russian Federation

prepodtkm@donstu.ruawj2001@Yandex.ruev_roschina@mail.ru

The article examines the effect of various factors on the wear rate of surfacing materials. The analysis was conducted in two main areas: the study of the wear processes kinetics, the influence of frictional contact conditions on wear resistance, and the determination of the mechanism of materials wear for severe frictional contact conditions. The authors studied the behavior of surfacing materials during slips on a plastic metal, including at high temperatures (up to 850–960 ° C), during rolling in the area of elastic contact and during rolling about a plastic metal, during a pulsating interaction in elastic and plastic areas, including the dynamic nature of contact loading and high temperatures.

The results of the study of contact damage models of surfacing materials show that it is possible to determine their wear resistance depending on the rate of fatigue development of microcracks and the duration of the process of destruction of the surface layer. It is proposed to determine the parameters of contact crack resistance, based on the geometric characteristics of the contact fracture areas and the duration of the process of their formation. In this case, when analyzing the process of destruction already at the initial stage of contact damage, it becomes possible to predict the contact endurance of surfacing materials as a whole. A complex was developed consisting of a friction machine equipped with a special sensor that detects the geometric characteristics of contact damage centers on the friction surface. The computer

определяет на поверхности трения геометрические характеристики очагов контактных разрушений. ЭВМ вычисляет параметры контактной трещиностойкости и определяет прогнозируемую величину контактной выносливости материала.

Ключевые слова: наплавочный материал, контактная выносливость, износостойкость, трещиностойкость, очаг контактного разрушения.

calculates the parameters of contact crack resistance and determines the predicted value of the contact endurance of the material.

Keywords: surfacing material, contact endurance, wear resistance, crack resistance, contact destruction center.

Введение. Результаты металлографических и фрактографических исследований свидетельствуют о том, что изнашивание наплавочных материалов в экстремальных условиях фрикционного контакта происходит неравномерно и имеет комплексный характер [1-5]. При скольжении кривые износа большинства материалов по истечении некоторого периода имеют резкие перегибы (рис. 1). Число циклов, которое соответствует этому перегибу, определяет фактически контактную выносливость наплавочных материалов. Интенсивность изнашивания после перегиба настолько велика, что не определяет износостойкость материала. Такой характер кривых износа проявляется во всех исследуемых видах фрикционного контакта.

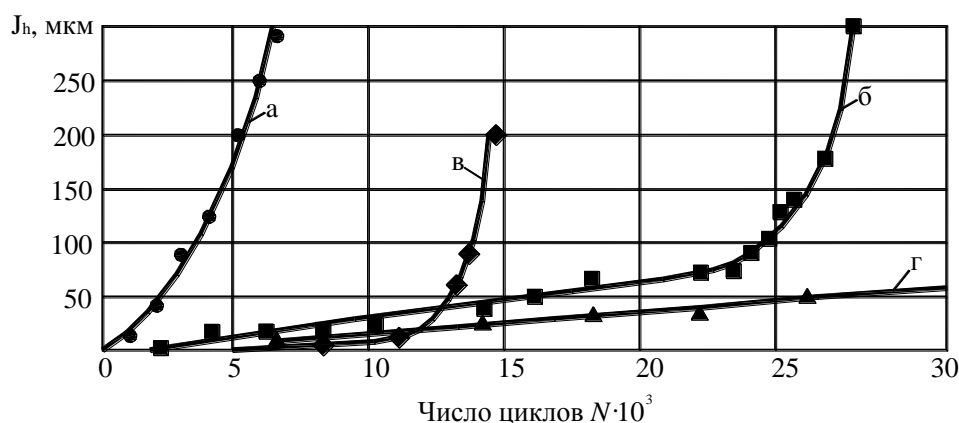


Рис. 1. Характерные кривые износа наплавочных материалов при скольжении о пластически деформируемый металл: $P = 500$ МПа, $v = 0,5$ м/с:
а — ЛГС1, б — ПГ-С1, в — ЗВ16К-2, г — ПГ-С1 ($P = 100$ МПа)

Исследование влияния различных факторов на интенсивность изнашивания наплавочных материалов проводилось по двум основным направлениям: изучение кинетики процессов изнашивания, влияния условий фрикционного контакта на износостойкость и определение механизма изнашивания материалов для тяжелых условий фрикционного контакта. Анализировалось поведение наплавочных материалов при скольжении о пластически деформируемый металл, в том числе при высоких (до 850–960 °С) температурах, при качении в области упругого контакта и при качении о пластически деформируемый металл, при пульсирующем взаимодействии в упругой и пластической области, в том числе при динамическом характере контактного нагружения и высоких температурах.

Для качения и пульсирующего взаимодействия более информативными являются зависимости площади контактного взаимодействия от числа циклов (рис. 2).

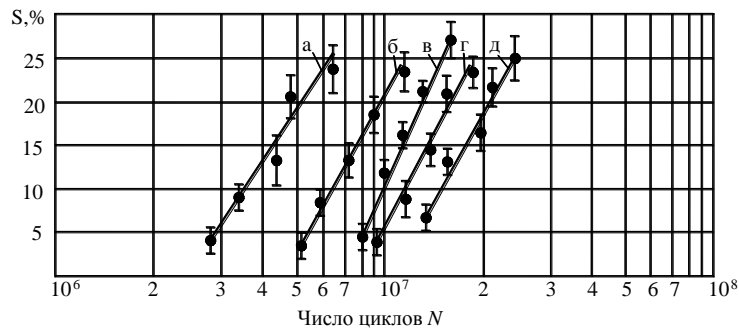


Рис. 2. Зависимости площади контактного повреждения от числа циклов обкатывания при фрикционном качении различных материалов, $P = 2000$ МПа: а — 3В16К, б — В3К (50 %) и 3В16К (50 %), в — В2К (50 %), г — В3К, д — 3В16К-2

Выявлено, что контактная выносливость наплавочных материалов зависит от условий фрикционного контакта и имеет комплексный характер, как это показано на рис. 3–5. Подобные зависимости установлены для всех разновидностей фрикционного контакта, характерных для тяжело нагруженных пар трения.

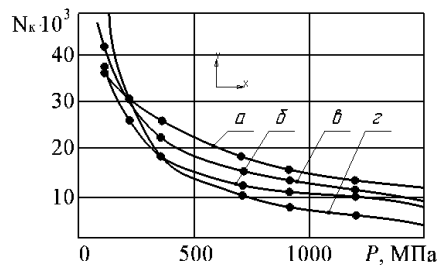


Рис. 3. Влияние давления на контактную выносливость, $v = 0,5$ м/с: а — В2К; б — В3К (50 %) и 3В16К (50%); в — В3К; г — ПГ-С1

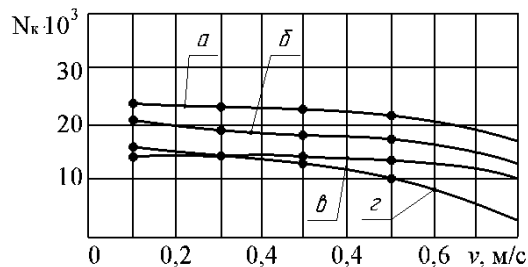


Рис. 4. Влияние скорости скольжения на контактную выносливость, $P = 500$ МПа: а — В2К; б — В3К (50 %) и 3В16К (50%); в — В3К; г — ПГ-С1

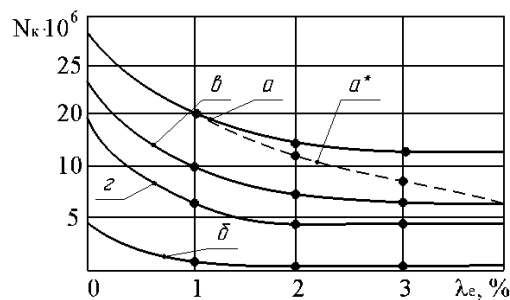


Рис. 5. Влияние величины относительного проскальзывания на контактную выносливость при качении, $P = 2000$ МПа: а – 3В16К; б — ПГ-СР3 (50 %) и ПГ-СР4 (50 %); в — В3К (50 %) и 3В16К (50 %); г — ПГ-С1

К сопутствующим видам изнашивания отнесены процессы схватывания первого и второго рода, абразивное и окислительное изнашивание. Эти процессы не определяют износостойкость наплавочных материалов и не рассматривались в исследовании [4, 6, 8].

К ведущему виду износа, который характерен для большинства наплавочных материалов, относятся процессы, связанные с контактным разрушением в области упругих деформаций поверхностного слоя (квазихрупкая контактная повреждаемость). К конкурирующему виду износа относятся процессы, связанные с контактным разрушением пластически передеформируемого поверхностного слоя (вязкий характер разрушения). При ведущем виде износа разрушение поверхностного слоя затрагивает большую глубину, частицы износа отделяются выкрашиванием в виде блоков, что характерно для всех анализируемых схем фрикционного контакта.

При конкурирующем виде износа разрушение сосредоточено в тонком поверхностном слое, частицы износа отделяются путем отслаивания в виде лепестков. Этот вид износа может быть отнесен к малоцикловой вязкой контактной повреждаемости. Все установленные виды повреждаемости могут переходить от одного вида к другому, а также протекать одновременно, что зависит от свойств материала и условий фрикционного контакта.

Более детальное рассмотрение процессов квазихрупкой контактной повреждаемости, которые отнесены к ведущему виду износа, позволяет выделить две его основные разновидности. В условиях качения и упругого пульсирующего контакта реализуется первый вид контактной повреждаемости: многоцикловая квазихрупкая повреждаемость (число циклов контактного нагружения может достигать 10^6-10^7). В условиях скольжения, качения или пульсирующего контакта о пластически деформируемый металл реализуется второй вид контактной повреждаемости: малоцикловая квазихрупкая повреждаемость (число циклов контактного нагружения не превышает 10^2-10^4).

На основе изложенного можно сделать вывод, что износостойкость наплавочных материалов определяется длительностью процесса развития в поверхностном слое усталостных микротрещин контактной повреждаемости. До 80–90% времени занимает именно эта стадия, поэтому стадиями зарождения и окончательного разрушения поверхностного слоя можно пренебречь. Непосредственное влияние на износостойкость оказывает скорость развития усталостных микротрещин. Явления фрикционной контактной усталости определяют длительность процесса образования частиц износа, а, следовательно, и величину контактной выносливости наплавочных материалов.

При контактных явлениях возможно усреднение параметров трещиностойкости по многим очагам контактного выкрашивания. При допущении об однородном распределении напряжений в поверхностном слое, для трещин в виде полуэллипса с осью, лежащей на поверхности трения, коэффициент интенсивности напряжений определяется выражением [10]:

$$K = \frac{1,12\pi^{\frac{1}{2}}}{E_n} \sigma_p l^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где E_n — полный эллиптический интеграл (в случае равенства полуосей эллипса $E_n = \pi/2$).

С учетом выражения М. В. Коровчинского для растягивающих напряжений [10], принимая $\nu = 0,27$ (сплавы на основе железа), при $n/2$ получим для качения с тангенциальным усилием в виде.

$$N_F = \frac{2}{(n^k - 2)C^k} \left[\frac{5,16}{(1 + 11f)\sigma_{z \max}^{\sin \alpha}} \right]^{n^n} \left(\frac{1}{l_1 \frac{n^k - 2}{2}} - \frac{1}{l_k \frac{n^k - 2}{2}} \right), \quad (2)$$

где n^k и C^k — параметры контактной трещиностойкости,

Аналогичные решения найдены также для качения без тангенциального усилия и для упругого пульсирующего контакта. Значения начальной l_1 и конечной l_k длин трещин определяются из геометрии очагов контактного разрушения. Таким образом, чтобы вычислить контактную выносливость, достаточно определить параметры контактной трещиностойкости n^k и C^k . Поскольку имеется два неизвестных, достаточно составить систему двух уравнений для двух независимых актов разрушения поверхностного слоя. Для качения с тангенциальным усилием получена система уравнений:

$$\begin{cases} N_1 = \frac{2}{(n^k - 2)C^k} \left[\frac{5,16}{(1+11f)\sigma_{z\max}^{\sin \alpha}} \right]^{n^k} \left(\frac{1}{l_1 \frac{n^k - 2}{2}} - \frac{1}{l_{k_1} \frac{n^k - 2}{2}} \right) \\ N_2 = \frac{2}{(n^k - 2)C^k} \left[\frac{5,16}{(1+11f)\sigma_{z\max}^{\sin \alpha}} \right]^{n^k} \left(\frac{1}{l_1 \frac{n^k - 2}{2}} - \frac{1}{l_{k_2} \frac{n^k - 2}{2}} \right) \end{cases}, \quad (3)$$

где N_1 и N_2 — число циклов для образования двух очагов контактного разрушения, l_{k_1} и l_{k_2} — соответственно конечные длины трещин.

Решение системы уравнений (3) дает выражения для параметров контактной трещиностойкости при качении с тангенциальным усилием:

$$n^k = 2 \left(\frac{l_n(N_2 - N_1)}{N_2 \ln\left(\frac{l_1}{l_{k_1}}\right) - N_2 \ln\left(\frac{l_1}{l_{k_2}}\right)} + 1 \right), \quad (4)$$

$$C^k = \frac{2}{(n^k - 2)N_i} \left(\frac{5,16}{(1+11f)\sigma_{z\max}^{\sin \alpha}} \right)^{n^k} \left[\left(\frac{\sin 2\alpha_1}{\bar{d}_1 \alpha_1} \right)^{\frac{n^k - 2}{2}} - \left(\frac{4}{4\bar{h}_{k_i}^2 - d_{k_i}^{*2}} \right)^{\frac{n^k - 2}{2}} \right], \quad (5)$$

где $\bar{d}_1, \bar{h}_{k_i}, d_{k_i}^*, \alpha$ — геометрические характеристики очагов контактного разрушения.

Аналогичные выражения для параметров контактной трещиностойкости определены для случаев качения без тангенциального усилия и пульсирующего упругого контакта.

Разработанный расчетно-экспериментальный метод прогнозирования контактной выносливости предусматривает, по результатам определения геометрических характеристик очагов контактного разрушения поверхности трения уже на начальной стадии, вычисление по выражениям (4) и (5) параметров контактной трещиностойкости n^k и C^k и, в результате, определение прогнозируемой контактной выносливости по уравнению (1).

В соответствии с таким подходом разработан специальный лабораторный комплекс, оснащенный средствами вычислительной техники для управления экспериментом и обработки информации.

Машина трения, лежащая в основе комплекса, оснащена специальным датчиком, который определяет на поверхности трения геометрические характеристики очагов контактных разрушений. ЭВМ вычисляет параметры контактной трещиностойкости и определяет прогнозируемую величину контактной выносливости материала. Вычисления повторяются по мере продолжения испытаний и появления очередных очагов контактного разрушения. Окончание работы программы происходит, когда отклонения в получаемых результатах составляют менее 10%. Метод позволяет существенно сократить длительность лабораторных испытаний (на 60–

70%) [7], так как необходимая информация определяется в начальной фазе испытаний. Метод рекомендуется для многоциклового квазихрупкой контактной повреждаемости.

Для малоциклового квазихрупкой контактной повреждаемости определены критерии износостойкости с учетом основных физико-механических свойств наплавочных материалов. В качестве критериев выступает контактная выносливость, т.е. число циклов, необходимое для разрушения поверхностного слоя.

Для условий скольжения о пластически деформируемый металл:

$$N_F = \frac{1}{2\pi^2} \frac{1}{(n-2)C(4pf)^n} \left[\frac{1}{l_1 \frac{n^n - 2}{2}} - \left(\frac{4pf}{\pi^2 K_{1C}^f} \right)^{n-2} \right], \quad (6)$$

где p — контактное давление, K_{1C}^f — вязкость разрушения.

Для термомеханической контактной усталости:

$$N_F = \frac{2(1-\nu)^n (b_{\max}^{\frac{n-2}{2}} - l_i^{\frac{n-2}{2}})}{(n-2)\pi^2 C(\alpha E \Delta T)^n l_i^{\frac{n-2}{2}} b_{\max}^{\frac{n-2}{2}}}, \quad (7)$$

где b_{\max} — предельное значение допуска на очаг выкрашивания, α — температурный коэффициент линейного расширения, ΔT — температурный перепад цикла нагрев-охлаждение, E — модуль упругости.

Для качения о пластически деформируемый металл:

$$N_F = \frac{1}{2\pi^2} \frac{b_{\max}^{\frac{n-2}{2}} - l_i^{\frac{n-2}{2}}}{(n-2)C(4pf)^n l_i^{\frac{n-2}{2}} b_{\max}^{\frac{n-2}{2}}}, \quad (8)$$

Аналогичные критерии износостойкости определены также и для других схем фрикционного контакта. Показано, что износостойкость наплавочных материалов при упрочнении тяжело нагруженных пар трения определяется комплексом физико-механических свойств, в том числе параметрами трещиностойкости.

Выводы. Износостойкость наплавочных материалов определяется длительностью процесса развития в поверхностном слое усталостных микротрещин контактной повреждаемости. Эта стадия занимает до 80–90% времени. Непосредственное влияние на износостойкость оказывает скорость развития усталостных микротрещин. Явления фрикционной контактной усталости определяют длительность процесса образования частиц износа, а, следовательно, и величину контактной выносливости наплавочных материалов.

Библиографический список

1. Колотиенко С. Д. Критерий контактной выносливости наплавочных материалов при качении / С. Д. Колотиенко, Л. В. Красниченко, А. М. Дидовец // Теория и практика создания, испытания и эксплуатации триботехнических систем. — Москва. — 1986. — С. 235–236.
2. Колотиенко С. Д. Контактная выносливость наплавочных материалов при качении / С. Д. Колотиенко, А. М. Дидовец, А. Л. Пивоваров // Применение новых материалов в сельскохозяйственном машиностроении. — Ростов-на-Дону. — 1985. С. 56–60.

3. Саврай Р. А. Контактная выносливость NiCrBSi покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки / Р. А. Саврай [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). — 2014. — №4. — С. 43–51.

4. Abrasive wear behavior of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings / C. Navas, R. Colaco, J. de Damborenea, R. Vilar // Surface and Coatings Technology. — 2006. — Vol. 200, iss. 24. — P. 6854–6862. — doi: 10.1016/j.surfcoat. 2005.10.032.

5. Щипачев А. М. Определение предела выносливости с учетом параметров качества поверхностного слоя / А. М. Щипачев, В. С. Мухин // Изв. вузов. Авиационная техника. — 1999. — № 3. — С. 23–25.

6. Петров Ю. А. Анализ термомеханической выносливости наплавочных материалов / Ю. А. Петров, П. Л. Холявко // Применение нов. матер. в машиностроении. — Ростов-на-Дону, 1997. — С. 11–15.

7. Рубанов В. В. Установка для исследования изнашивания наплавочных материалов при трении качения / В. В. Рубанов, С. Д. Колотиенко // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11, № 9(60). — С.1646–1650.

8. Сулейманов В. Н. Исследование изнашивания и повышения износостойкости тяжело нагруженных кулаков кузнечно-прессовых машин, работающих в условиях трения качения: дисс. канд. тех. наук / В. Н. Сулейманов. — Ростов-на-Дону. — 1978. — 150 с.

9. Винокуров, Г. Г. Статистическое описание микрогеометрии поверхности износа порошковых покрытий и материалов при трении скольжения / Г. Г. Винокуров, О. Н. Попов, Н. Ф. Стручков // Физическая мезомеханика. — 2009. — Т. 12, № 2. — С. 59–65.

10. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов // Машиностроение. — Москва. — 1977. — 526 с.

11. Нетягов П. Д. Исследование триботехнических характеристик металлических покрытий, нанесенных наплавкой, электродуговым и плазменным напылением // П. Д. Нетягов [и др.] // Трение и износ. — 1989. — Т.10, №5. — С. 909–913.