

ОБЛАДНАННЯ ТА РЕМОНТИ

УДК 621.17:539.422

doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181409

© Ширяев А.В.¹, Ширяев И.А.², Разинкин Е.М.³,
Шклярчук О.С.⁴**ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ
ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛЕЙ 15X И 90XФ**

Выполнен сравнительный анализ известных исследований контактно-усталостной повреждаемости как образцов для контактно-усталостных испытаний, так и различных деталей. Показано, что достаточно полно разработан механизм образования выкрашивания в области контакта, определены причины появления микро- и макродефектов, совокупности компонентов напряженного состояния, приводящих к появлению выкрашиваний. Установлены стадии развития микровыкросок и дальнейшего хрупкого разрушения поверхностного слоя. На основании проведенного анализа сделаны выводы об отсутствии количественных характеристик распределения контактно-усталостных повреждений поперек дорожки контакта. Приведены данные об изменении шероховатости контактирующей поверхности для образцов из закаленных сталей в абсолютных величинах, однако не представлен обобщенный анализ этого изменения в относительных величинах. На основе выполненных исследований установлены зависимости распределения микро- и макровыкросок поперек дорожки образцов из среднеуглеродистой незакаленной и высокоуглеродистой закаленной сталей, зависимости изменения глубины макровыкросок, а также произведен анализ изменения относительной шероховатости поверхности для валковых сталей различной твердости.

Ключевые слова: контактно-усталостное выкрашивание, механизм образования выкрашивания, максимальные контактные напряжения, распределение напряжений, шероховатость контактной поверхности, микровыкроски, макровыкроски.

Ширяев О.В., Ширяев И.А., Разинкин Е.М., Шклярчук О.С. Дослідження контактно-втомної пошкоджуваності поверхні зразків із сталей 15X і 90XФ. Виконано порівняльний аналіз відомих досліджень контактно-втомної пошкоджуваності як зразків для контактно-втомних випробувань, так і різних деталей. Показано, що досить повно розроблено механізм утворення викришування в області контакту, визначені причини появи мікро- і макродефектів, сукупності компонентів напруженого стану, що призводять до появи викришування. Встановлено стадії розвитку микровикросок і подальшого крихкого руйнування поверхневого шару. На підставі проведеного аналізу зроблено висновки про відсутність кількісних характеристик процесу контактно-втомного пошкодження поверхні, утворення і розвитку викришування, а також розподілу контактно-втомних пошкоджень поперек дорожки контакту. Наведено дані про зміну шорсткості поверхні, що контактує, для зразків із загартованих сталей в абсолютних величинах, однак не представлено

¹ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, aleks20075858@gmail.com

² аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Siryaev.iva@gmail.com

³ студент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, rzazinKin@bk.ru

⁴ студент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, shklyaruk01@gmail.com

узагальнений аналіз цього змінення в відносних величинах. На основі виконаних досліджень уточнено особливості утворення і розвитку контактної втоми поверхні циліндричних зразків. Наведено зміну розмірів максимальних ви крошек для зразків, не зміцнених і зміцнених за допомогою поверхневого пластичного деформування. Встановлено залежності розподілу мікро- і макровикрошек поперек доріжки зразків з середньовуглецевої незагартованої і високовуглецевої загартованої сталей, залежності зміни глибини макровикрошек від контактних напружень і числа циклів, а також проведено аналіз змінення відносної шорсткості поверхні для валкових сталей різної твердості. Запропоновано емпіричні залежності для визначення тривалості підробітки поверхні, та максимального зниження її шорсткості, а також строку служби деталі до контактної втоми.

Ключові слова: контактна втома, механізм утворення ви крошек, максимальні контактні напруження, розподіл напружень, шорсткість контактної поверхні, мікровикрошки, макровикрошки.

O.V. Shiryayev, I.A. Shiryayev, E.M. Razinkin, O.S. Shklyaruk. Investigation of contact fatigue damageability of the surface of 15X and 90HF steel samples. A comparative analysis of the known studies of contact fatigue damageability of both samples for contact fatigue tests and various machine parts has been performed. It has been shown that a mechanism for the formation of defects in the contact area has been fully developed, and the reasons for the initiation of micro- and macro defects; a set of stress state components resulting in the initiation of defects, have been determined. The stages of microdefects development and further brittle fracture of the surface layer have been established. Based on the analysis, conclusions were drawn as to the absence of quantitative characteristics of the distribution of contact fatigue damage across the contact track. The data on the change in the roughness of the contacting surface for samples of hardened steels in absolute values have been given; however, a generalized analysis of this change in relative values has not been presented. Based on the completed studies, the quantitative characteristics of the defects formation process have been clarified, the dependences of the distribution of micro and macroscopic defects across the sample path from medium-carbon unhardened and high-carbon hardened steels, the dependence of the change in the depth of macroscopic defects have been determined, and the change in the relative surface roughness of steels for rolls of various hardness has been analyzed.

Keywords: fatigue contact defects, defects formation mechanism, maximum contact stresses, stress distribution, contact surface roughness, micro defects, macro defects.

Постановка проблеми. Сопротивление контактной усталости является одной из важнейших прочностных характеристик деталей, подвергаемых циклическому нагружению. Контактной усталости подвержены зубчатые колеса, подшипники качения, колеса рельсового состава, валки прокатных станов и т. д. [1-6]. Так, по некоторым данным выход рабочих валков из строя из-за отслоений и выкрашивания составляет 30-40%, а расход активного слоя опорных валков клетей кварто – 20-50%.

Повышение сопротивления контактной усталости возможно только при условии детального исследования механизма образования повреждений, причин и источников зарождения трещин, этапов их развития, напряженного состояния в зоне их появления. Важным аспектом данной проблемы является изучение распределения напряжений вдоль образующей контактной поверхности, мест возникновения контактно-усталостных дефектов, а также их качественный и количественный анализ.

Еще одним направлением ее решения следует считать прогнозирование степени контактно-усталостной повреждаемости поверхности в процессе циклического нагружения с целью предотвращения катастрофического развития повреждений. В качестве характеристики состояния поверхности может быть выбрано изменение ее шероховатости.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследованию и анализу процесса повреждаемости контактирующих поверхностей посвящено достаточное количество работ.

В работе [1] выполнен анализ рельсовых дефектов, их классификация, проведены исследования и сравнения причин контактно-усталостных деформаций на участках пути разного типа и в разных эксплуатационных условиях.

Детальное исследование видов дефектов наружных колец колесных пар отражено в литературном источнике [2]. Подробно рассмотрены такие виды дефектов как: контактно-усталостные раковины, вызываемые переменными контактными нагрузками; контактно-усталостное повреждение (шелушение) дорожки качения – выкрашивание металла дорожки качения, вызванное процессом естественной усталости металла под действием высоких контактных давлений, проскальзывания роликов, нарушения масляной пленки; трещина на дорожке качения – нарушение целостности кольца, вызванное перегрузками, создающими высокие напряжения и приводящими к растрескиванию и раскалыванию; наличием концентраторов напряжений, дефектов металла; несоблюдением технологии изготовления (главным образом – термообработки).

В работах [3, 4] подробно исследован механизм и процесс контактно-усталостного повреждения поверхности контакта и образования выкрашивания на цилиндрических образцах из стали 75X2ГМНФ твердостью 33HRC. Фрактографическое исследование поверхности и подповерхностных слоев после выхода из строя образцов из строя позволило определить, что первичные трещины возникают одновременно как на поверхности, так и под поверхностью. Приведены возможные критерии контактно-усталостного повреждения.

Закономерности возникновения повреждений на образцах из стали Р6М5 при их испытаниях на контактную выносливость приведены в литературном источнике [5]. На первой стадии протекает наклеп материала, который сопровождается изменением текстурного рисунка стали Р6М5, унаследованного от структуры заготовки. Контактное нагружение поверхностного слоя, сопровождающееся увеличением степени наклепа, обеспечивает генерацию дополнительных внутрикристаллических дефектов в материале металлической матрицы поверхностного слоя. Постепенное накопление внутрикристаллических дефектов активизирует рост микротрещин и их слияние, в результате чего стадия наклепа переходит в стадию зарождения питтинга. Удаление отделившихся фрагментов из зоны контактного взаимодействия обновляет рабочую поверхность, в результате внутренние слои металла вступают в контакт с контртелом. При этом повторяются структурные изменения, запускающие новый цикл процесса «упрочнение–питтингообразование».

Результаты исследования зарождения и развития усталостной трещины в рельсах с термомеханическим повреждением даны в работе [6]. На основе циклических испытаний натуральных рельсовых проб и численного моделирования напряженно-деформированного состояния рельса с трещиной были определены характеристики трещиностойкости и параметры кинетики развития усталостных трещин в рельсовой стали. Исследовано поэтапное движение трещины, установлено, что трещина зарождалась в различных местах поверхности катания рельса, но не приведена закономерность и причины ее появления именно в этих зонах.

Механизм контактной усталости поверхностей тел качения подшипников в работе [7] исследовался с помощью специальных экспериментов и численного моделирования развития разрушений. Детальный анализ усреднённых данных испытаний показывает, что развитие области выкрашивания происходит в три этапа: инкубационный период, когда на дорожке качения не наблюдается никаких заметных разрушений ($0,44-0,53$ от конечного числа циклов до разрушения N_k); стадия начального развития разрушения, отражает экспоненциальный рост области повреждения ($0,76-0,84N_k$); быстрое распространение, при котором темп распространения повреждения существенно увеличивается (от $0,97 N_k$ до конечного числа циклов).

Теоретическое распределение напряжений по длине контактной дорожки вдоль ее образующей, полученное на образцах диаметром 22, 100 и 1000 мм из стали 75X2ГМНФ, приведены в работе [8], а на образцах диаметром 35 мм – в работе [9].

Изменение шероховатости рабочей поверхности образцов диаметром 22 мм из стали 9Х1Ш ковальной HRC 60 в процессе обкатки, при начальных контактных напряжениях 3000, 3500, 4000 и 4500 МПа в абсолютных величинах даны в работе [4]. Аналогичные исследования изменения шероховатости контактной поверхности для образцов из стали 75X2ГМНФ HRC 33

при начальных контактных напряжениях 2090 и 2500 МПа, глубины выкрошек из этой же стали в зависимости от среднего контактного напряжения за время испытаний содержатся в литературном источнике [10].

Несмотря на наличие достаточно полных данных о причинах появления контактно-усталостных повреждений, механизма образования выкрашивания, а также изменения состояния поверхности, в упомянутых работах отсутствуют количественные характеристики процесса образования и развития контактно-усталостных повреждений, мест возникновения выкрошек вдоль образующих тел и закономерностей изменения шероховатости вне зависимости от ее начальной величины и числа циклов нагружения.

Вышеуказанные вопросы требуют более детального изучения механизма образования выкрашивания поверхности контакта цилиндрических тел, его количественных характеристик.

Целью данной работы является исследование количественных характеристик этапов развития контактно-усталостных повреждений, выявление закономерностей изменения величины и глубины выкрашивания от контактного напряжения и конечного числа циклов нагружения; местоположения выкрошек вдоль образующей образцов с цилиндрической контактной дорожкой. Не менее важная задача – это установление зависимости шероховатости поверхности от контактных напряжений, числа циклов нагружения для оценки стадий контактно-усталостного повреждения и прогнозирования конечного срока службы детали.

Изложение основного материала. Исследования проводились на одноконтактной установке МИ1-М, адаптированной к испытаниям на сопротивление контактной усталости. Образцы диаметром 35 мм с цилиндрической рабочей дорожкой изготавливались из стали 15Х твердостью HRC18-20 и стали 90ХФ твердостью HRC40-45, применяемой для изготовления опорных валков толстолистовых станов.

Контактно-усталостные повреждения имели различный вид (рис. 1, рис. 2), причем их количество и размер не связан ни с маркой стали, ни с контактным напряжением. Все контактно-усталостные повреждения можно выделить в следующие группы: выкрошки небольшого размера по всей поверхности; обилие небольших выкрошек при наличии одиночных крупных выкрошек; две или несколько сплошных полос небольших выкрошек; сплошные полосы крупных выкрошек; сплошные полосы крупных поверхностных трещин, видимых невооруженным глазом. Одиночные выкрошки на неповрежденной поверхности, как правило, не встречались.

Исследование стадий повреждаемости в процессе обкатки выполнялось при остановке испытаний через определенное число циклов. Поверхность в одном сечении фотографировалась цифровым фотоаппаратом через объектив «Микроскопа измерительного МПБ-3» с увеличением $\times 25$ (рис. 1). В результате проведенных исследований установлены следующие этапы возникновения и развития контактно-усталостного повреждения поверхности:

1) сглаживание микронеровностей поверхности от 0 до $0,01 N_k$ от конечного числа циклов N_k (рис. 1, а, б), когда рельеф после шлифования рабочей дорожки пластически деформируется и на дорожке качения не наблюдается никаких разрушений;

2) образование «ячеек» – областей, ограниченных микротрещинами, от $0,01 N_k$ до $0,3 N_k$ (рис. 1, б, в);

3) образование микровыкрошек на стыке «ячеек» и объединение их в колонии от $0,3 N_k$ до $0,6 N_k$ (рис. 1, в, г);

4) рост микровыкрошек и образование первичных выкрошек с размерами, сопоставимыми с шириной площадки контакта, $0,6 N_k$ до $0,75 N_k$ (рис. 1, г, д);

5) инициация выкрошками, являющимися концентраторами напряжений, развития макроразрушений – вторичных макровыкрошек, значительно превышающих по размерам ширину площадки контакта (рис. 1, е, ж). Причем образование и развитие выкрошек происходит на всей поверхности одновременно, вплоть до конечного числа циклов (рис. 1, ж). На фото можно наблюдать и микровыкрошки, и первичные, и вторичные выкрошки одновременно.

Результаты данных исследований количественно хорошо коррелируются с материалами, представленными в работах [3] и [7], что подтверждает правильность уточненной модели развития контактно-усталостных повреждений поверхности.

Влияние механических свойств материала образцов на возникновение и развитие контактно-усталостного разрушения исследовалось на двух марках стали, имеющих различное со-

держание углерода и твердость поверхности. Рядовая сталь 15X после нормализации имела твердость 18-24HRC и предел текучести 300-400 МПа, а закаленная по заводской технологии валковая сталь 90ХФ, соответственно, 40-45 HRC и 1100-1200 МПа. Кроме того, исследовались образцы, рабочая поверхность которых была упрочнена поверхностно-пластическим деформированием (ППД) при помощи шарика. Потеря работоспособности образца в процессе циклического нагружения фиксировалось по резкому возрастанию вибрации установки и визуальному обнаружению макровыкросек значительных размеров или множественных выкросек меньшего размера. Следует отметить, что меньшие контактные напряжения вызывали появление выкрашиваний небольших размеров и, соответственно, меньшую вибрацию. Поэтому при оценке результатов исследований учитывалась эта особенность.

Зависимость величины выкросек от контактного давления, числа циклов для образцов, не подвергнутых упрочнению, а также упрочненных ППД, из стали 15X приведены на рис. 3-4.

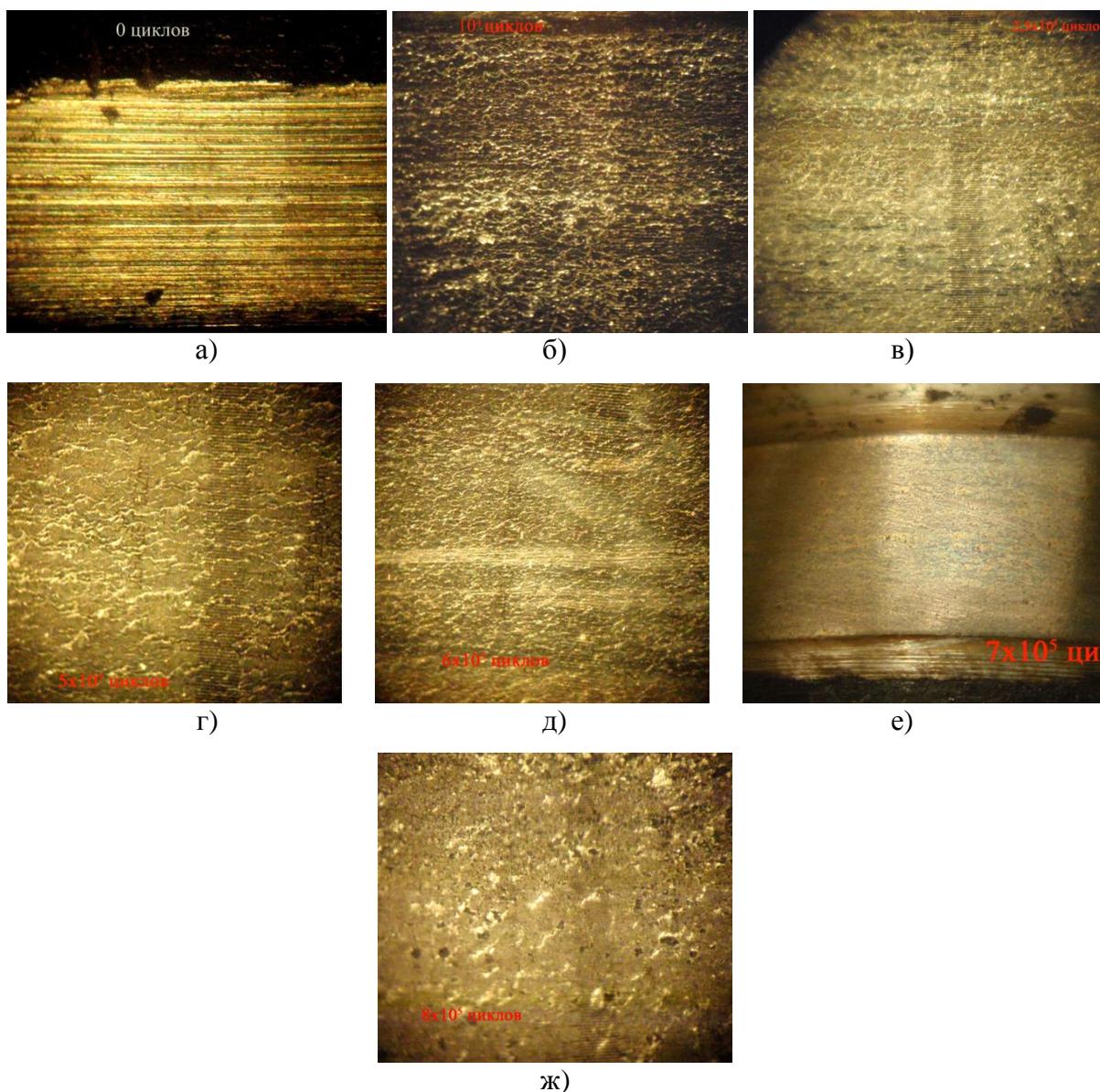


Рис. 1 – Контактно-усталостные повреждения поверхности образца из стали 90ХФ твердостью 40-45HRC при различном числе циклов: а – 0 циклов ($\times 50$); б – 10^4 циклов ($\times 50$); в – $2,5 \times 10^5$ циклов ($\times 50$); г – 5×10^5 циклов ($\times 50$); д – 6×10^5 циклов ($\times 50$); е – 7×10^5 циклов ($\times 1$); ж – 8×10^5 циклов ($\times 50$)

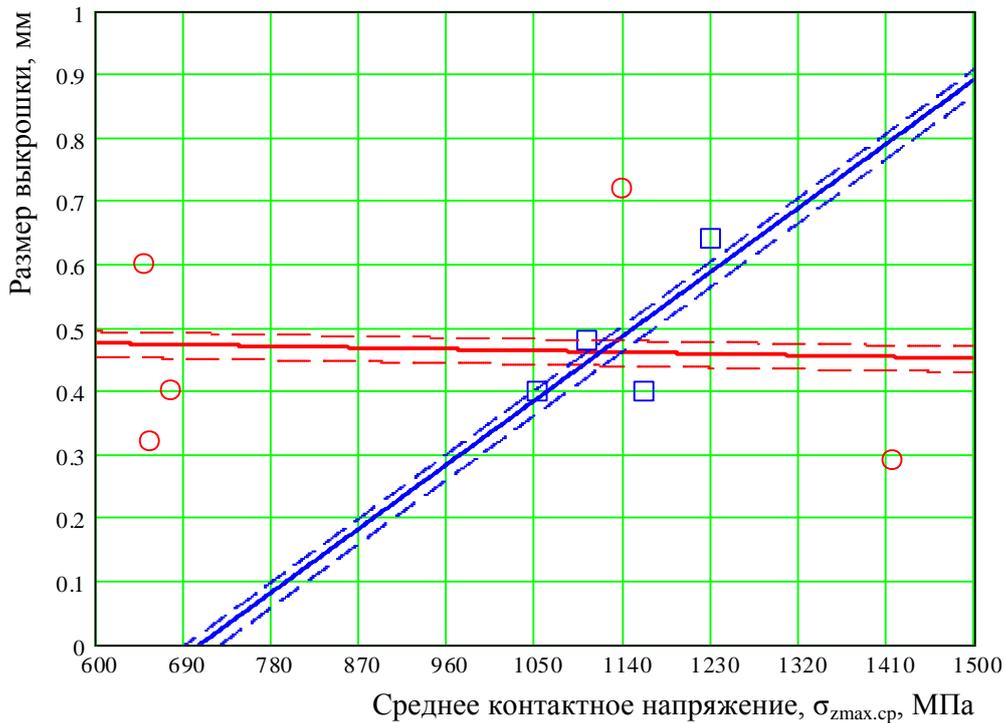


Рис. 2 – Изменение размера максимальных выкрошек от среднего контактного напряжения образцов из стали 15X неупрочненных (\circ) и упрочненных ППД (\square), погрешность измерений (- - -)

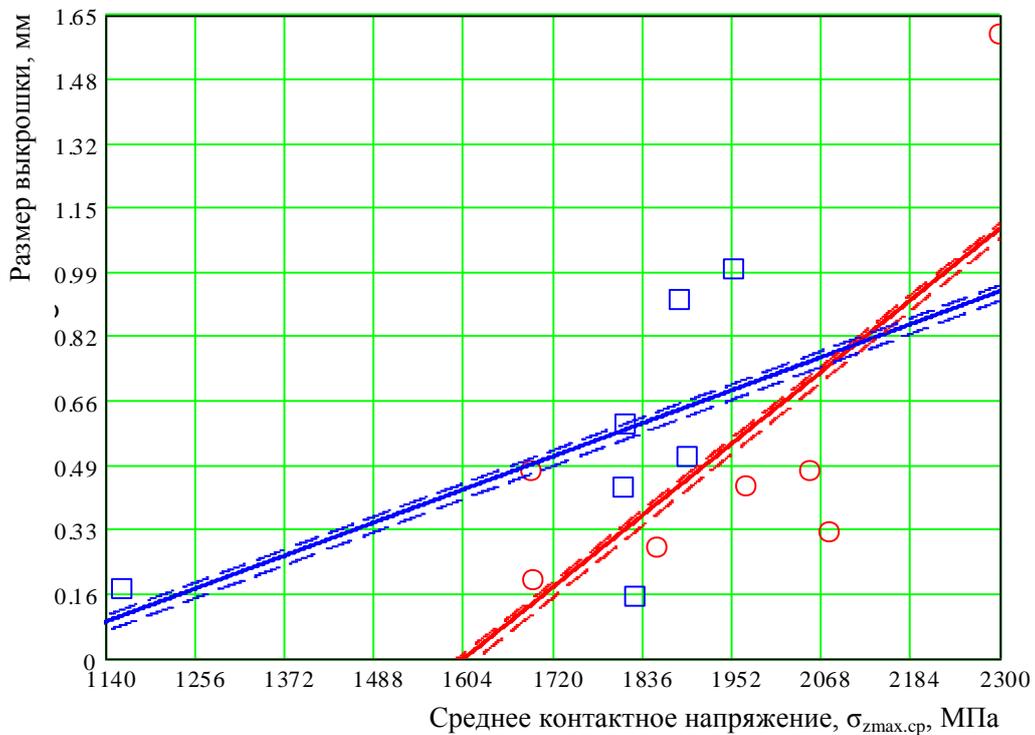


Рис. 3 – Изменение размера максимальных выкрошек от среднего контактного напряжения образцов из стали 90XФ, неупрочненных (\circ) и упрочненных ППД (\square), погрешность измерений (- - -)

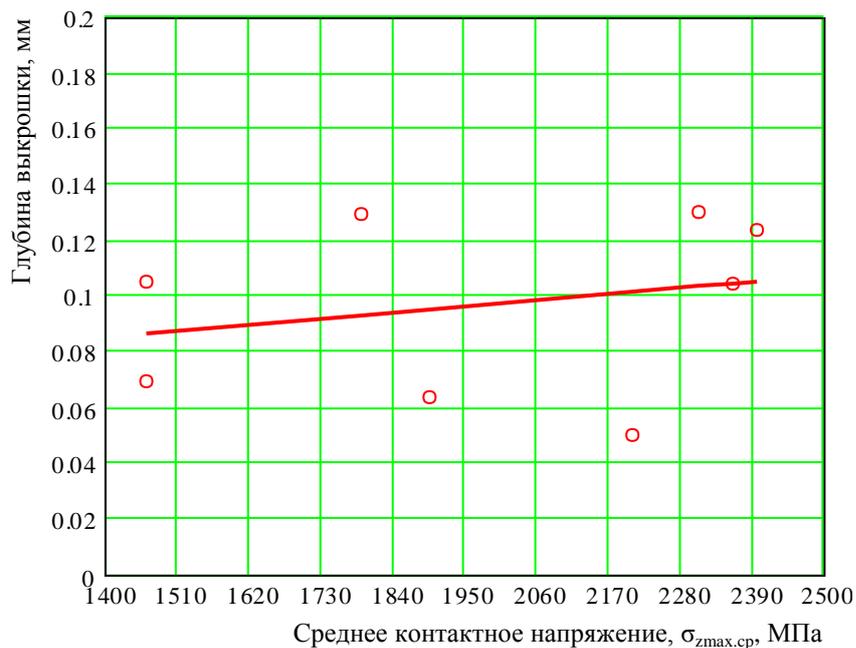


Рис. 4 – Изменение глубины минимальных выкрошек от среднего контактного напряжения образцов из стали 75Х2ГМНФ твёрдостью 33HRC установки «22»

При исследовании размеров максимальных (вторичных) выкрошек получены вполне ожидаемые результаты. Если у неупрочненных образцов рост выкрашивания происходил достаточно плавно, не вызывая значительных вибраций, и выход из строя образца определялся чаще по визуальным наблюдениям, то у образцов, упрочненных ППД, процесс появления выкрошек имел иной характер. Поверхностно-пластическое деформирование значительно упрочняло поверхностный слой, а также сглаживало микронеровности, являющиеся концентраторами напряжений. Накопление трещин под поверхностью приводило к скачкообразному образованию первичных выкрошек. Кроме того, более хрупкий поверхностный слой разрушался на большую глубину, чем у более мягких, неупрочненных образцов.

Зависимость размера максимальных (вторичных) выкрошек на поверхности образцов из стали 15Х (рис. 2) подтверждает предположение о хрупком разрушении упрочненного ППД, более твердого слоя, при больших напряжениях. Тогда как более пластичный образец при наличии первичных выкрошек менее чувствителен к повышению контактного напряжения.

Для более прочной стали 90ХФ закономерности развития вторичных выкрошек (максимальных) несколько отличались от аналогичных закономерностей для пластичной стали (рис. 3). Размеры макрвыкрошек при возрастании контактного напряжения резко увеличивались, что свидетельствовало о хрупком разрушении поверхностного слоя как упрочненных ППД, так и неупрочненных образцов.

Исследование глубины выкрошек выполнялось на образцах диаметром 22 мм из стали 75Х2ГМНФ твёрдостью 33HRC установки «22» конструкции ВНИИМЕТМАШ. Измерение производилось при помощи микроскопа микротвёрдомера ПМТ-3. Перемещением тубуса наводилась резкость на края выкрошки, затем на дно. По разности показаний микрометрического винта с ценой деления 0,002 мм определялась глубина выкрошки. Результаты замеров глубины минимальных (первичных) выкрошек и максимальных выкрошек (вторичных) приведены на рис. 4-5.

Проанализировав полученные зависимости, сделаны следующие выводы. Небольшое увеличение глубины первичных выкрошек со значительным ростом контактных напряжений объясняется комплексным влиянием всех компонентов напряженного состояния на процесс формирования выкрашивания, а не только величиной контактных напряжений на поверхности [10]. Соответственно, с увеличением конечного числа циклов глубина первичных выкрошек также уменьшается, т. к. образцы с большей долговечностью испытывались при меньших контактных напряжениях.

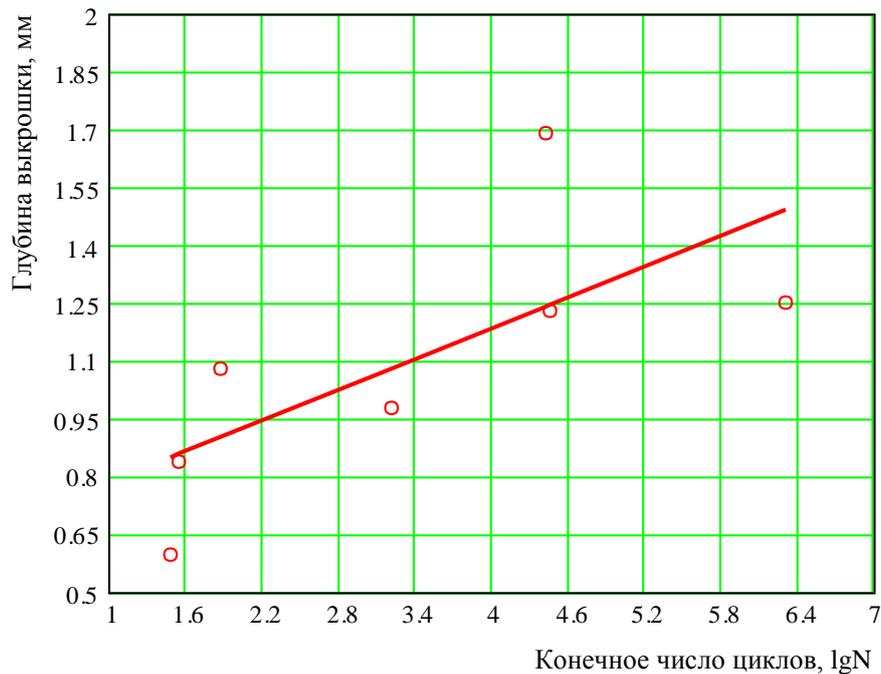


Рис. 5 – Изменение глубины максимальных выкрошек от конечного числа циклов образцов из стали 75X2ГМНФ твердостью 33HRC установки «22»

Вторичные выкрошки образуются при хрупком разрушении подповерхностного слоя за счет образования разветвленных макротрещин из первичной выкрошки, неровное дно которой является мощным концентратором напряжений [3]. Величина нормальных напряжений на всей площадке контакта не играет первостепенную роль, и глубина вторичной выкрошки определяется длительностью развития хрупких трещин. Кроме того, при меньших контактных напряжениях появление вторичной выкрошки из-за небольшой вибрации было менее заметно. Время, необходимое для фиксации появления выкрашивания и остановки испытаний, значительно увеличивалось. За этот период макротрещины под поверхностью интенсивно разрастались, вызывая выкрашивание большой глубины. При высоких же контактных напряжениях появление даже небольшой вторичной выкрошки вызывало значительную вибрацию, что приводило к немедленной остановке испытаний.

Возрастание глубины выкрашивания с ростом конечного числа циклов (рис. 5) подтверждает вышеприведенное, т. к. образцы с большим сроком службы испытывались при меньших контактных напряжениях.

Обобщая проведенные исследования размеров и глубины первичных и вторичных выкрошек, можно сделать предположение, что повышение контактных напряжений при испытании образцов с цилиндрической рабочей дорожкой в совокупности с другими компонентами напряженного состояния увеличивает размеры и глубину первичных выкрошек; большое контактное напряжение вызывает значительные ударные нагрузки о края выкрошки, приводящие к быстрому выходу образца из строя.

Еще одним важным вопросом исследования повреждаемости деталей с цилиндрической рабочей поверхностью является определение местоположения максимальных (вторичных) выкрашиваний вдоль продольной оси. Замер положения макровыкрошек выполнялся на образцах из стали 15X и 90XФ после их испытания на контактную усталость. Поверхность с выбранными максимальными выкрошками в одном или нескольких сечениях фотографировалась цифровым фотоаппаратом через объектив «Микроскопа измерительного МПБ-3» с увеличением $\times 25$. Полученные данные представлены на графиках (рис. 6). Местоположение выкрошек дано в относительных координатах x/a , где x – положение выкрошки относительно центра дорожки, а a – ее полуширина. Это дало возможность для сопоставления местоположения выкрошек образцов с различными размерами дорожки контакта.

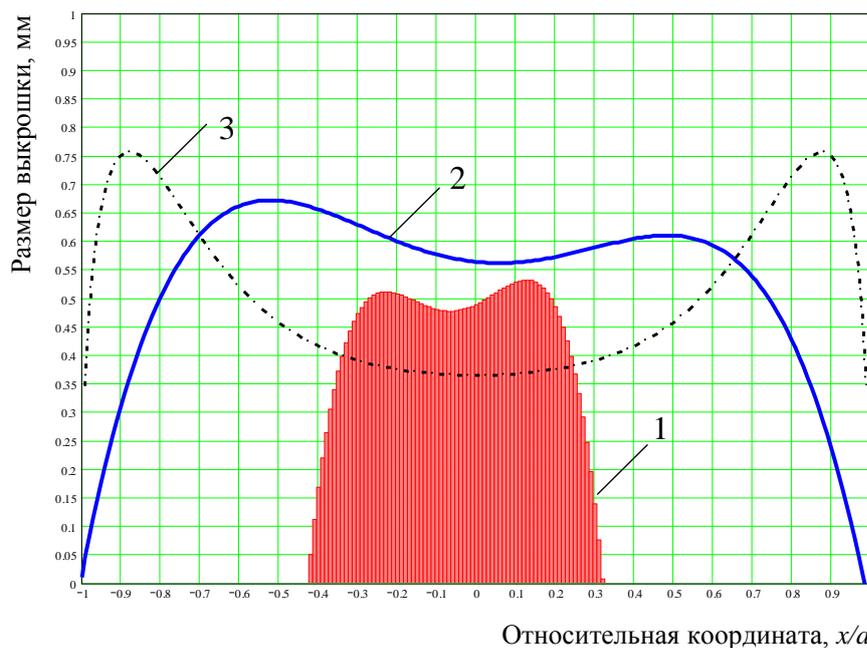


Рис. 6 – Кривые аппроксимации полиномом 3-й степени величины максимальных выкрошек по длине контактной поверхности образцов из стали 15X (1), 90XФ (2) и теоретическое распределение максимального контактного напряжения σ_{zmax} (3)

В результате проведенных исследований установлены следующие закономерности в расположении максимальных выкрошек вдоль оси образца с цилиндрической дорожкой.

У образцов из закаленной валковой стали 90XФ максимальные выкрошки располагались ближе к краям дорожки по сравнению с образцами из стали 15X. С целью установления теоретической зависимости величины выкрошек от их местоположения, экспериментальные данные были аппроксимированы полиномом 3-й степени вида $a_0 + a_1(x/a) + a_2(x/a)^2 + a_3(x/a)^3$. При сопоставлении полученных распределений с теоретической зависимостью изменения контактного напряжения вдоль образующей при представлении ее полиномом $y = x^8$ (рис. 6) можно предположить следующее. Общий вид закономерностей распределения максимальных выкрошек вдоль образующей качественно схож с эпюрой распределения контактных напряжений. Максимумы размеров выкрашиваний для более твердой стали 90XФ располагаются ближе к максимумам эпюры напряжений, чем для более пластичной стали 15X. Вполне вероятно, это вызвано пластической деформацией больших участков в зоне максимума контактных напряжений. Можно предположить, что профиль дорожки имеет иную форму, отличающуюся от поверхности, описываемой полиномом 8-й степени. Возможные варианты распределения контактных напряжений приведены в работе [8]. Этот вопрос требует более углубленного изучения, проведения детального исследования профилей образцов из стали 15X и 90XФ.

Одним из компонентов комплексного анализа контактно-усталостной повреждаемости поверхностей тел качения является исследование изменения шероховатости поверхности. То, что это изменение имеет вполне определенные закономерности, отмечено в работах [4, 10]. Недостаток приведенных данных – шероховатость и число циклов – даны в натуральных величинах, а это затрудняет сопоставление полученных результатов.

Исследование изменения шероховатости контактирующих поверхностей проводилось на образцах установки «22» конструкции ВНИИМЕТМАШ. Образцы изготавливались из стали 75X2ГМНФ твердостью HRC33 и из стали 9X1Ш (сталь ЭШП, ковкая) твердостью HRC60. Такое различие твердости и прочности обуславливало и различную долговечность образцов, и различное изменение шероховатости поверхности. Данные изменения шероховатости были приведены к единому виду зависимостей относительной шероховатости Ra/Ra_0 от относительного числа циклов N/N_K . Где Ra и Ra_0 – текущая и исходная шероховатость, N и N_K – текущее и конечное число циклов нагружения образца.

В результате анализа установлено, что не имеется строгой зависимости шероховатости от начального контактного напряжения. Возможно, это связано с достаточно узким диапазоном заданных нагрузок. В то же время отмечена явная закономерность расположения экспериментальных точек от твердости. И можно выделить три четких периода: период приработки, характеризующийся снижением шероховатости, период минимальной шероховатости и период резкого ее возрастания. Эти периоды достаточно точно совпадают с периодами развития контактно-усталостного повреждения поверхности [4, 7]. Такое совпадение позволяет принять изменение шероховатости в качестве критерия прогнозирования долговечности деталей при контактно-усталостном нагружении.

С этой целью, результаты экспериментальных исследований [4, 10] были сгруппированы по твердости и аппроксимированы полиномами 3-й степени (рис. 7) вида:

$$R_a(N, HRC) = a_0(HRC) + a_1(HRC)N + a_2(HRC)N^2 + a_3(HRC)N^3. \quad (1)$$

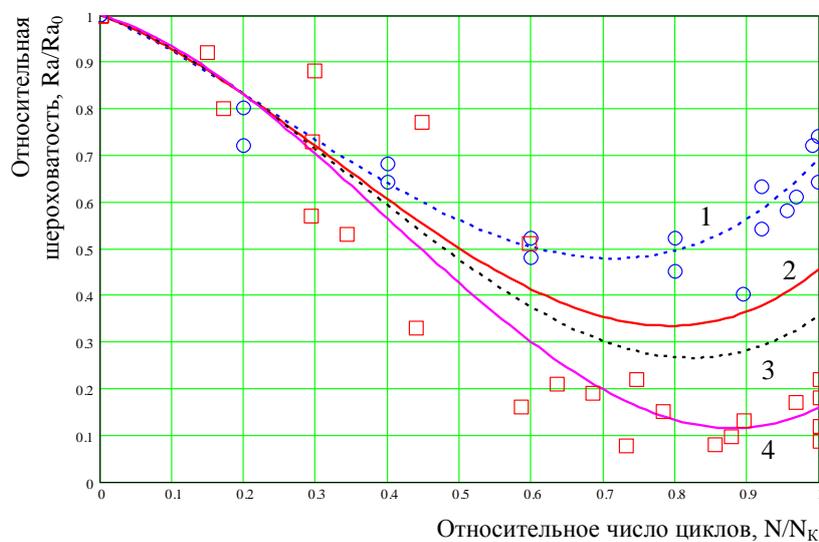


Рис. 7 – Изменения относительной шероховатости для образцов твердостью HRC33 (1), HRC45 (2), HRC50 (3), HRC60 (4), описанные полиномами 3-й степени, в зависимости от числа циклов и экспериментальные точки изменения шероховатости образцов диаметром 22 мм из стали 75X2ГМНФ твердостью HRC33 – \circ , и 9Х1Ш HRC60 – \square , при различных контактных напряжениях

После анализа изменения коэффициентов полинома от твердости предложены их следующие зависимости:

$$\begin{aligned} a_0(HRC) &= 1; a_1(HRC) = -0,95478738 + 8,30387111 \cdot 10^{-3} HRC \\ a_2(HRC) &= 0,31006388 - 0,0450512 \cdot HRC; a_3(HRC) = 0,98567282 + 0,01703456 \cdot HRC. \end{aligned} \quad (2)$$

Графики изменения шероховатости для различной твердости приведены на рис. 7. Минимум шероховатости для образца любой твердости можно найти, приравняв производную зависимости (1) к нулю:

$$N(HRC)_{\min} = \frac{-2a_2(HRC) + \sqrt{[-2a_2(HRC)]^2 + 4[3 \cdot a_3(HRC) \cdot a_1(HRC)]}}{6a_3(HRC)}. \quad (3)$$

Относительно гладкой поверхность образцов из стали 90ХФ твердостью HRC45 становится при числе циклов от 5 до 6×10^5 циклов (0,67-0,8 N/N_k). Согласно расчетам по формуле (3) минимум шероховатости будет при числе циклов 0,793 N/N_k , что вполне совпадает с экспериментальными данными. Более того, предложенные зависимости дают сходный результат с данными в работе [7] по продолжительности этапов контактно-усталостной повреждаемости. Таким образом, предложенные зависимости изменения шероховатости (1)-(3) можно использовать для прогнозирования потери несущей способности деталей при циклическом контакте.

Выводы

1. Показано, что предлагаемые авторами модели механизма контактно-усталостной повреждаемости проработаны недостаточно полно, отсутствуют обобщенные количественные характеристики его этапов, позволяющие оценить состояние поверхности и прогнозировать оставшийся срок службы детали.
2. На основе проведенных исследований и анализа их результатов уточнены этапы контактно-усталостной повреждаемости поверхности, определены количественные характеристики распределения максимальных выкросов поперек рабочей дорожки для пластичной и закаленной стали.
3. Установлена объективная характеристика состояния поверхности, ее относительная шероховатость, определены ее эмпирические зависимости от относительного числа циклов для сталей различной твердости, что позволяет прогнозировать остаточный ресурс работы детали.
4. Задачами дальнейших исследований является уточнение закона изменения контактного напряжения вдоль оси цилиндрического тела, подвергнутого циклическому нагружению в зависимости от твердости поверхности и прочностных характеристик материала детали.

Список использованных источников:

1. Кремнев Е.А. Причины контактно-усталостных дефектов / Е.А. Кремнев // Мир транспорта. – М., 2012. – № 2. – С. 62-65.
2. Ерохин А.С. Дефекты и повреждения подшипников качения / А.С. Ерохин // Вагонный парк. – Харків, 2015. – № 9-10 (102-103). – С. 26-31.
3. Фирсов В.Т. Исследование повреждаемости стали при контактно-усталостном нагружении / В.Т. Фирсов, Ю.В. Зима, А.В. Ширяев // Вестник машиностроения. – М., 1989. – № 2. – С. 16-21.
4. Ширяев А.В. Исследование сопротивления контактной усталости сталей, используемых для изготовления прокатных валков / А.В. Ширяев, В.Т. Фирсов, Б.А. Морозов, Т.Н. Побежинова, Е.М. Скворцова // Вестник машиностроения. – М., 1988. – № 7. – С. 6-8.
5. Степанкин И.Н. К вопросу исследования контактной выносливости быстрорежущей стали Р6М5 / И.Н. Степанкин, В.М. Кенько, Е.П. Поздняков // Вестник Полоцкого государственного университета. – Полоцк : ПГУ, 2012. – № 3. – С. 39-45. – (Серия В : Промышленность. Прикладные науки. Машиностроение).
6. Тихомиров В.М. Исследование усталостной прочности рельса с термомеханическим повреждением / В.М. Тихомиров // Известия транссиба. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2013. – № 1(13). – С. 101-106.
7. Моралес-Эспехель Г.Э. Развитие разрушений подшипников качения вследствие контактной усталости при качении / Г.Э. Моралес-Эспехель, А. Габелли. – Режим доступа: <http://evolution.skf.com/ru/развитие-разрушений-подшипников-кач/>.
8. Контактная усталостная прочность опорных валков / Б.А. Морозов, В.К. Шашкин, В.Т. Фирсов, И.И. Карпунин, А.В. Ширяев // Напряжения, деформации и расчеты на прочность металлургических машин : Сб. науч. тр. ВНИИМЕТМАШ. – 1988. – С. 31-42.
9. Ширяев А.В. Исследование контактных напряжений деталей с образующими сложной формы / А.В. Ширяев // Механіка машин – основна складова прикладної механіки : матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. (11-13 квітня 2017 р.; Дніпро). – Дніпро : Національна Металургійна Академія України, 2017. – С. 170-173.
10. Ширяев А.В. Разработка методов исследования и определение сопротивления контактной усталости материала валков листовых прокатных станов ; дис. ... канд. техн. наук : 05.04.04, 01.02.06 / Ширяев Александр Владимирович. – М., 1991. – 216 с.

References:

1. Kremnev E.A. Prichiny kontaktno-ustalostnykh defektov [Causes of contact-fatigue defects]. *Mir transporta – World of Transport*, 2012, no. 2, pp. 62-65. (Rus.)
2. Erokhin A.S. Defekty i povrezhdeniia podshpnikov kacheniiia [Defects and Damage to Rolling Bearings]. *Vagonnii park – Wagon Park*, 2015, no. 9-10 (102-103), pp. 26-31. (Rus.)
3. Firsov V.T., Zima Yu.V., Shiryayev A.V. Issledovanie povrezhdaemosti stali pri kontaktno-

- ustalostnom nagruzhenii [Study of steel damage during contact-fatigue loading]. *Vestnik mashinostroeniia – Bulletin of mechanical engineering*, 1989, no. 2, pp. 16-21. (Rus.)
4. Shirayayev A.V., Firsov V.T., Morozov B.A., Pobezhimova T.N., Skvortsova Ye.M. Issledovanie soprotivleniia kontaktnoi ustalosti stalei, ispol'zuemykh dlia izgotovleniia prokatnykh valkov [Investigation of the contact fatigue resistance of steels used for the manufacture of mill rolls]. *Vestnik mashinostroeniia – Bulletin of mechanical engineering*, 1988, no. 7, pp. 6-8. (Rus.)
 5. Stepankin I.N., Kenko V.M., Pozdnyakov E.P. K voprosu issledovaniia kontaktnoi vynoslivosti bystrorezhushchei stali R6M5 [To the question of the study of contact endurance of high-speed steel R6M5]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki. Mashinostroenie – Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied sciences*, 2012, no. 3, pp. 39-45. (Rus.)
 6. Tikhomirov V.M. Issledovanie ustalostnoi prochnosti rel'sa s termomekhanicheskim povrezhdeniem [Study of fatigue strength of a rail with thermomechanical damage]. *Izvestiia transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2013, no. 1 (13), pp. 101-106. (Rus.)
 7. Morales-Espehele G.E., Gabelli A. Development of Rolling Bearing Destructions Due to Contact Fatigue in Rolling Available at: <http://evolution.skf.com/ru/развитие-разрушений-подшипников-кач/> (accessed 10 May 2019).
 8. Morozov B.A., Shashkin V.K., Firsov V.T., Karpukhin I.I., Shirayayev A.V. Kontaktno-ustalostnaia prochnost' opornykh valkov [Contact-fatigue strength of the support rolls]. *Napriazheniia, deformatsii i raschety na prochnost' metallurgicheskikh mashin – Stresses, deformations and strength calculations of metallurgical machines*, 1988, pp. 31-42. (Rus.)
 9. Shiryaev, A.V. Issledovanie kontaktnykh napriazheniiia detalei s obrazuiushchimi slozhnoi formy. *Materiali Vseukr. nauk.-tehn. konf. «Mehanika mashin – osnovna skladova prikladnoyi mehaniki»* [Investigation of contact stresses of parts with complex-forming components. Materials of the All-Ukrainian Sci.-Techn. Conf. «Mechanic of Machines – the main warehouse of applied mechanics»]. Dnipro, 2017, pp. 170-173. (Rus.)
 10. Shiryaev A.V. *Razrabotka metodov issledovaniia i opredelenie soprotivleniia kontaktnoi ustalosti materiala valkov listovykh prokatnykh stanov*. Diss. kand. techn. nauk [Development of research methods and determination of contact fatigue resistance of the material of rolls of sheet rolling mills. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 1991. 216 p. (Rus.)

Рецензент: В.В. Суглобов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 29.04.2019