

## ЛИТЕРАТУРА

1. Путь и безопасность движения поездов. Под ред. В.Я. Шульги. –М.: Транспорт, 1994. 199 с.;
2. Проектирование железнодорожного пути. Под ред. Г.М. Шахунянца. – М.: Транспорт, 1972. –320 с.;
3. Лиманов А. Метрополитены. –М.: Транспорт, 1971. – 359 с.;
4. Сосновский Л.А. Основы трибофатики. –Гомель: БелГУТ, 2003. –Т.1. –246 с., –Т.2. –234 с.

УДК 620.178.16; 620.178.3

**В.В. Комиссаров**

**НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ  
КОНТАКНОЙ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ**

*Белорусский государственный университет транспорта  
Гомель, Беларусь*

При эксплуатации зубчатых и червячных передач нередки случаи, когда через некоторое время после начала работы на рабочих поверхностях зубьев возникают трещины и образуются ямки выкрашивания (питтинги). Начавшееся выкрашивание может затем прекратиться, а образовавшиеся углубления в процессе дальнейшей работы передачи могут постепенно загладиться. В этом случае возникает «ограниченное» (местное) или «начальное» выкрашивание, не приносящее особого ущерба. Гораздо хуже, когда начавшееся выкрашивание прогрессирует до окончательного повреждения поверхностей зубьев и их износа в сравнительно короткий срок.

Передача, в которой началось прогрессирующее поверхностное разрушение зубьев, еще пригодна для передачи нагрузки, но из-за искажения профилей зубьев в зацеплении возникают, особенно у прямозубой передачи, большие добавочные динамические (ударные) усилия, увеличивающие скорость разрушения и усиливающие шум передачи. Масло при этом загрязняется частичками выкрошившегося металла, которые заклиниваются между зубьями, повреждая их поверхности и усиливая процесс изнашивания. Если к тому же и подшипники смазываются тем же маслом, что и зубчатые колеса, то повреждаются и подшипники.

Непрекращающееся выкрашивание поверхностей зубьев, усиленное истиранием частицами металла и неровными поверхностями зубьев, через более или менее продолжительный промежуток времени ведет к излому зуба [1]. Основным фактором, определяющим возникновение и развитие этих процессов является контактная усталость – процесс накопления повреждений и разрушения поверхностного слоя металла под действием повторно-переменных контактных напряжений при трении качения, сопровождающийся возникновением трещин, развитие которых приводит к износу отслаиванием и образованием ямок выкрашивания (питтингов).

Процесс контактной усталости во многом сходен с процессом усталости вообще (образование и постепенное развитие трещин, зависимость долговечности и предела выносливости от ряда факторов и т.д.), однако имеет и свои специфические черты. Они обусловлены тем, что в зоне контакта реализуется объемное напряженное состояние, имеют место резкие градиенты компонент напряжения, происходит локализация максимальных напряжений в небольших объемах металла. Это приводит, например, к резкому изменению степени и характера деформирования металла по мере удаления вглубь от поверхности. Если в поверхностном слое, особенно на вершинах микровыступов, наблюдается значительная пластическая деформация металла, то уже

на глубине, всего в несколько раз превышающей размер контактной площадки, напряжения составляют лишь десятые или сотые доли от величины предела упругости. Кроме того, при контактной усталости характерно наличие двух опасных объемов: один – это тонкий поверхностный слой на площадке контакта, другой – это подповерхностная зона максимальных касательных напряжений на глубине, зачастую меньшей, чем размеры контактной площадки. При наличии больших касательных усилий на контактной площадке эти две зоны могут слиться в одну [2].

При реализации механизма контактной усталости наблюдаются два характерных вида поверхностного разрушения: образование питтингов и изнашивание отслаиванием. Изнашивание отслаиванием проявляется в виде отделения тонких чешуек или пластинок охрупченного металла. Питтинг представляет собой выкрашивание отдельных мест поверхности, иногда сопровождающееся выколом (отколом) довольно больших фрагментов металла. Размеры ямок выкрашивания (и их число) увеличиваются с ростом числа циклов нагружения.

Контактно-усталостный ресурс зависит от многих факторов, например, формы и размеров, испытываемых образцов или деталей, характера приложения нагрузки и ее величины, наличия или отсутствия смазки, механических свойств материала, температуры окружающей среды и пр. Природа влияния многих из них, особенно во взаимодействии, изучена недостаточно. Рассмотрим здесь четыре проблемы: зависимость сопротивления контактной усталости от уровня механических свойств материала, размеров испытываемых объектов, касательной силы и смазки.

Установлено, что сопротивление контактной усталости хорошо коррелирует с твердостью материала: обычно с ее ростом предел контактной выносливости увеличивается. Это иллюстрирует рис. 1, на котором совмещены опытные данные, взятые нами из работ [1, 3-5]. Разные структуры, даже если они однородны, обнаруживают различное сопротивление контактной усталости. Особо следует отметить, что термообработка углеродистой стали может обеспечить предел контактной выносливости, сравнимый с его величиной для легированных сталей (азотированных и цементованных). Это имеет принципиальное значение: не всегда нужно стремиться к применению дорогих сталей и трудоемких технологий их упрочнения, чтобы получить относительно высокий уровень сопротивления контактной усталости.

Как следует из рис. 1, зависимость предела усталости при контактном нагружении от твердости является практически линейной в среднем ( $\sigma_{Hlim} = 2,3HB$ ), но рассеяние значений относительно среднего значения достигает  $\pm 30\%$  и более. Важная особенность рассеяния пределов выносливости состоит в том, что оно существенно растет с увеличением твердости материала (см. штрих-пунктирные линии на рисунке 1)

Шероховатость поверхности оказывает большое влияние на сопротивление контактной усталости. Экспериментами установлено, что решающее значение имеет не просто шероховатость поверхности, а отношение суммы неровностей обеих поверхностей  $\sum R_z$  к толщине масляной пленки  $\Delta h$ , т.е.  $\Delta k = \sum R_z / \Delta h$ . Опыты показывают, что параметр  $\Delta k$  может изменять  $N$  на порядок, а  $\sigma_k$  – до 6 раз [1].

Влияние шероховатости для металлов средней твердости поверхностей является значительным в том случае, когда период приработки равен или больше периода испытаний на усталость. В отличие от образцов из сталей малой и средней твердости, закаленные образцы прирабатываются быстро, но конечная высота неровностей зависит от исходной.

Экспериментальные исследования показали, что внешняя касательная сила существенно снижает сопротивление металлов контактной усталости.

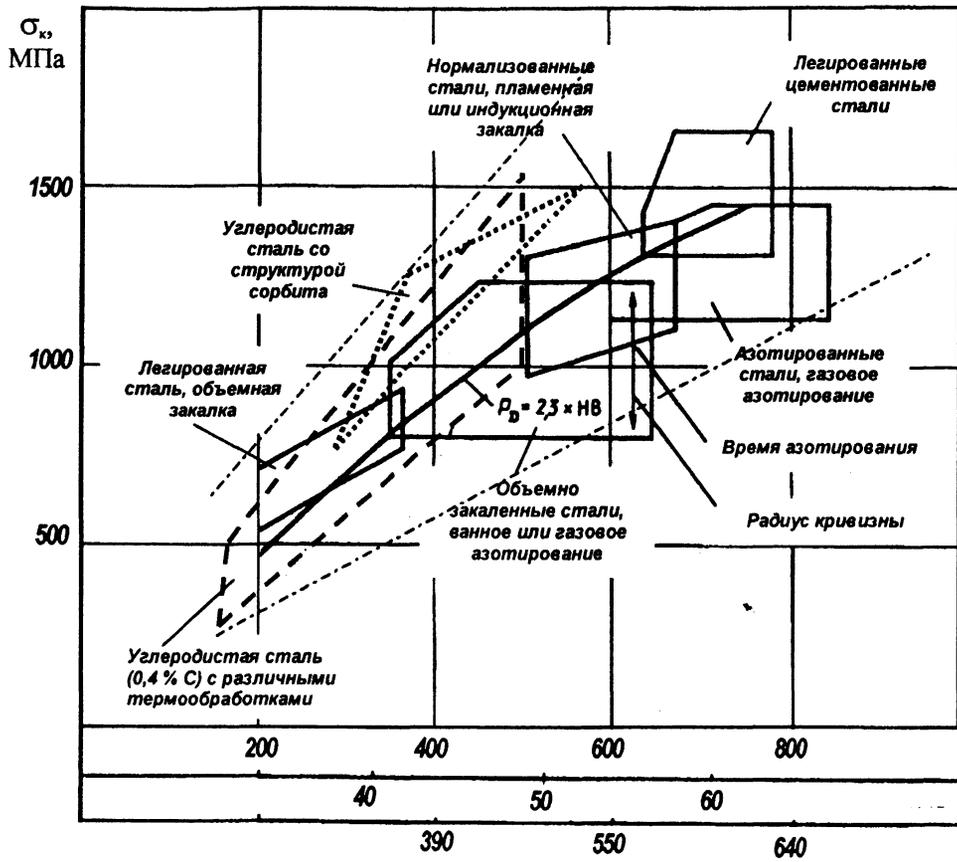


Рис. 1. Обобщенная зависимость сопротивления усталости при контактном нагружении ( $\sigma_{Hlim}$ ) от твердости для разных материалов и способов упрочнения

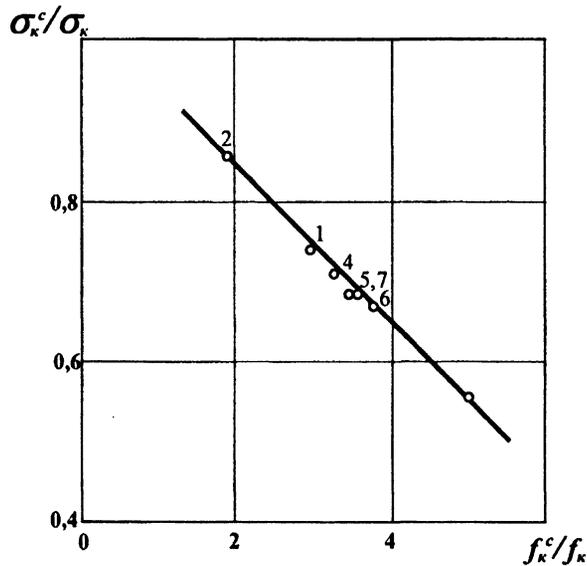


Рис. 2. Зависимость отношения величин пределов контактной выносливости при скольжении и без скольжения от отношения коэффициентов трения при скольжении и без скольжения для различных материалов

На рис. 2 показаны зависимости, иллюстрирующие влияние коэффициента трения качения  $f_k$  на изменение предела контактной выносливости  $\sigma_k$  ( $\sigma_k^c, f_k^c$  – те же величины,

определенные при реализации проскальзывания до 20%). Испытаниям подвергали ролики из стали с 0,41% С (точки 1 на рис. 2), никелевого чугуна (2), стали 50 (3), стали 37ХН3А (4), стали 45 (5), цементованной стали (6). В относительном снижении контактной выносливости несомненную роль играет коэффициент трения скольжения  $f_k^c$  (здесь во всех случаях  $f_k = 0,02 = \text{const}$ ) [1, 3].

Эффект снижения предела выносливости при качении с проскальзыванием для цилиндрических зубчатых колес, а также роликов с параллельными осями удовлетворительно описывается эмпирической формулой [1]:

$$\frac{\sigma_k}{\sigma_k^c} = \frac{0,2 + 2,28f_k - 1,5f_k^2}{0,2 + 2,28f_k^c - 1,5(f_k^c)^2}, \quad (1)$$

которая основывается на выражении для приближенной оценки приведенного напряжения на площадке контакта.

В процессе контактной усталости твердость поверхности и размер контактной площадки интенсивно увеличиваются при первых циклах нагружения ввиду пластической деформации поверхностного слоя. Со временем эта зависимость затухает; после  $\sim 10^5$  циклов (сталь 75Х2ГНМФ для прокатных валков) твердость практически не изменяется, а ширина контактной площадки линейно возрастает в результате износа вплоть до  $3 \cdot 10^6$  циклов. Шероховатость поверхности снижается от первоначальной 0,5 мкм до 0,1 мкм.

Масштабный эффект при контактной усталости претерпевает инверсию. Основные закономерности таковы [1, 8, 9, 10, 11]:

а) С увеличением диаметра  $d$  от 4 до 10 мм контактирующих роликов и шариков, изготовленных из стали ШХ15 (HRC = 62–64), их долговечность при  $p_0 = \sigma_{zmax} = 5000$  МПа возрастает в 2–5 раз.

б) При проведении испытаний образцов стали 75Х2ГНМФ диаметром 22, 110 и 1000 мм, наблюдается следующая картина: крупные образцы диаметром 1000 мм обнаруживают большую долговечность по сравнению с образцами диаметром 22 и 110 мм. Так, при давлении в центре контактной площадки  $p_{0эжв} = 1500$  МПа долговечность образца диаметром 22 мм составляет  $5 \cdot 10^5$  циклов, а образца диаметром 1000 мм –  $9 \cdot 10^6$  циклов.

в) Относительный износ  $I$  – отношение изменения радиуса образца к полуширине контактной площадки  $b$  (за вычетом пластической деформации) – для образца диаметром 1000 мм составил  $I = 0...29$  мкм/мм, а для образца диаметром 110 мм  $I = 27...163$  мкм/мм, т.е. износ тем больше, чем меньше образец (обычный масштабный эффект).

г) Чем больше диаметр образца, тем больше абсолютное значение глубины  $h$  и площади очагов выкрашивания (при одинаковых  $\sigma_{zmax}$  и  $N$ ). Так, для стали 45 в образцах  $d = 6,5$  мм средняя глубина ямок выкрашивания не превышала 30–60 мкм, а при  $d = 40$  мм она достигала 270 мкм.

д) Чем больше  $d$ , тем большее число циклов нагружения требуется для достижения одинаковой степени контактного повреждения (рис. 3: сталь 45 – 1, 2, 3 выкрашивание соответственно сплошное, умеренное, единичное).

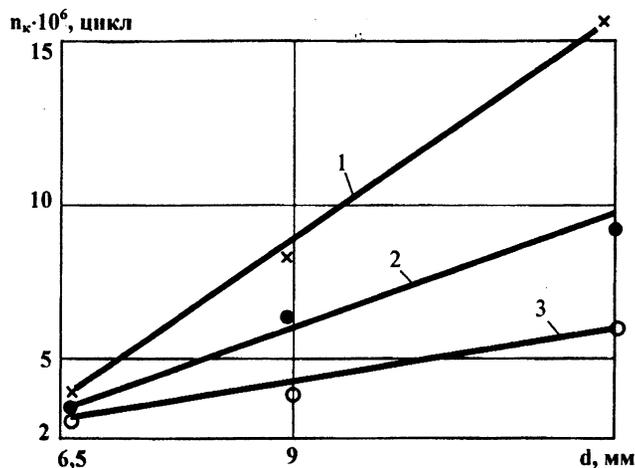


Рис. 3. Зависимость числа циклов нагружения от диаметров образцов

Так, при  $\sigma_{zmax} = 1700$  МПа и глубине выкрашивания  $h_z = 38...44$  мкм после  $3 \cdot 10^6$  циклов достигалась площадь выкрашивания  $S = 1,16...1,41$  мм<sup>2</sup>, тогда как для образцов диаметром 12 мм для примерно такой же поврежденности потребовалось  $8 \cdot 10^6$  циклов.

Если теория масштабного эффекта при обычной усталости достаточно хорошо разработана (см., например, работу [6]), то при контактной усталости таковая, по имеющимся сведениям, имеет лишь качественный характер. По-видимому, удовлетворительная теория масштабного эффекта может быть построена на основе статистической модели деформируемого твердого тела с опасным объемом [7].

При качении без смазки усталостные трещины практически не возникают: они образуются при наличии смазки, в том числе и капельной. Влияние смазки на процесс контактной усталости двояко.

а) При высоких давлениях в зоне контакта масло оказывает отрицательное влияние. Под действием набегающей поверхности, а также вследствие капиллярности, масло внедряется в рыхлости, неровности, микротрещины и расширяет их, вызывая ускоренное выкрашивание металлов (расклинивающий эффект). Особенно резко это явление выражено в случае, если одна из поверхностей в зоне повышенного давления подвергается растяжению, которое способствует раскрытию микротрещин. Содержание в смазке водных примесей, также как и смазка с водой, приводит к насыщению поверхностного слоя стали водородом, и, следовательно, к водородной хрупкости, резко ускоряющей процесс контактной усталости.

б) С другой стороны, при умеренных давлениях в зоне контакта масляная пленка способствует более равномерному распределению давления по фактической поверхности контакта; она является эффективным теплопроводящим агентом; вызывает гидродинамический эффект – поступаая в суживающуюся часть зазора, смазка разделяет поверхности металлов, так что в сочленении наступает жидкостное трение. Все это способствует росту сопротивления металлов контактной усталости.

Таким образом, влияние различных факторов на сопротивление контактной усталости материалов является многообразным и сложным. И требуется выполнить комплекс специальных исследований (теоретических и экспериментальных), чтобы удовлетворительно описать явление контактной усталости как специфический процесс накопления поверхностных повреждений, сопровождающийся износом материала и заканчивающийся локальным разрушением рабочей поверхности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Трубин Г.К. Контактная усталость Материалов для зубчатых колес. – М.:

Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1962. – 404 с.; 2. Сосновский Л.А. Основы трибофатики. – Гомель: БелГУТ, 2003. – Т.1. – 246 с., – Т.2. – 234 с.; 3. Сосновский Л.А. Механика усталостного разрушения: Словарь-справочник. Ч.1/ НПО «Трибофатика». – Гомель, 1994. – 328 с.; 4. Сусин А.А. Химико-термическое упрочнение высоконапряженных деталей. – Мн.: Белорусская наука, 1999. – 175 с.; 5. Термически упрочненные рельсы/ Под ред. А.Ф. Золотарского – М.: Транспорт, 1976. – 264 с.; 6. Трощенко В.Т., Красовский А.Я., Покровский В.В., Сосновский Л.А., Стрижало В.А. Сопротивление материалов деформированию и разрушению: Справочное пособие. Ч.1. – Киев: Наукова думка, 1993. – 288 с.; 7. Сосновский Л. А. Статистическая механика усталостного разрушения. – Мн.: Наука и техника, 1987. – 288 с.; 8. Фирсов В.Г.// Вестник машиностроения. 1990. №10. – С.38-40.; 9. Контактная прочность машиностроительных материалов. – М.: Наука. 1972. – 198 с.; 10. Драйгор Д.А., Вальчук Г.И. Влияние износа на усталостную прочность стали с учетом масштабного фактора. – Киев: Изд-во АН УССР, 1962. – 111 с.; 11. Драйгор Д.А. Износостойкость и усталостная прочность стали в зависимости от условий обработки и процесса трения. – Киев: Изд-во АН УССР, 1959. – 142 с.

УДК 621.01.007.51

V.B.Algin, S.V.Lomonosov

## STRUCTURAL-AND-PARAMETRIC SYNTHESIS OF A REGULAR SYSTEM WITH USING A GENETIC ALGORITHM

*Scientific and Engineering Enterprise “Belavttractorostroenie”,  
The Institute of Mechanics and Reliability of Machines  
of the National Academy of Sciences of Belarus  
Minsk, Belarus*

**Abstract.** Any system consists of interconnected elements. The elements parameters influence the operational mode and output system parameter. The complex system has control parts, several operational modes and output parameters. The regularity of any system means that rules of associating the elements in subsystems and rules of connecting the subsystems, i.e. creation of a system structure, are known. Usually a problem of synthesizing the structure is decided in the beginning. The suitable structure is selected. Then parameters of the system elements are found. In this paper we propose a general model of structural-and-parametric synthesis of the regular system with required output parameters. For the solution a genetic algorithm is used. The features of the regular systems with control parts are taken into account. Power transmission systems are considered as a characteristic practical object. The subsequent stage of lifetime synthesis is briefly discussed, when the system is virtually materialized, and some information on it can be used for optimizing the higher level system (machine or machines system).

**Key Words.** Regular system, Structure, Elements, Control parts, Parameters, Synthesis, Genetic algorithm, Power transmission system.

1 Introduction. The technical and other systems are regular. It means that rules of forming the systems are known. We suppose that if there is a universal analytical model, which allows calculating the output parameters of the system for any structure, control actions and values of internal parameters, the stages of structural and parametric synthesizing have to be aggregated. It is rationally that the structural-and-parametric synthesis is solved as a general problem with using of genetic algorithm (GA). Development of analytical models of