

УДК 621.81+539.62

ВЛИЯНИЕ ВИДОВ НАГРУЖЕНИЯ НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ С ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

INFLUENCE OF LOADING CONDITIONS ON A FATIGUE ENDURANCE FOR COMPONENTS WITH WEAR-RESISTANT COATINGS

А. А. Ракицкий,

заместитель директора по научной работе Республиканского института инновационных технологий БНТУ,
канд. техн. наук, доцент

A. Rakitsky

Дата поступления в редакцию — 01.02.2016 г.

В статье исследовано влияние различных силовых факторов на параметры усталости стальных деталей с термонапыленными порошковыми износостойкими покрытиями на основе никель-хрома. Приведены результаты сравнительного анализа характеристик сопротивления усталости покрытых и непокрытых образцов цилиндрической среднеуглеродистой стали при действии знакопеременного растяжения-сжатия и кручения. Описана методика проведения циклических испытаний прямоугольных образцов пружинной стали на четырехточечный изгиб. Показано некоторое снижение усталостной долговечности деталей вследствие хрупкого характера разрушения поверхностей. Предложены рекомендации по достижению компромисса между разными механизмами повреждения в целях обеспечения заданного ресурса конструкции.

An influence of different force factors on fatigue parameters of steel components with thermal spray powder wear-resistant coatings on the Nickel-Chrome base is studied. The results of a comparative analysis of fatigue resistance characteristics for coated and uncoated cylindrical steel specimens under the action of an alternative push-pull and torsion are adduced. The method of a conducting of cyclical tests for spring steel right-angled specimens under four-point bending is described. Some lowering of a fatigue endurance of components due to brittle character of a surface fracture is shown. For the purpose of ensuring a given service life of structures some recommendations on making a compromise between different failure mechanisms are proposed.

В машиностроении широко используются технологии упрочнения и повышения ресурса трибосопряжений деталей сборочных единиц [1]. Среди них достаточно эффективными и хорошо отработанными являются методы газопламенного напыления твердосплавных порошковых покрытий с применением различных активирующих факторов в технологическом процессе. Износостойкость контактирующих поверхностей увеличивается «в разы», в то вре-

мя как изменения других параметров утраты работоспособности соединений не столь значительны, либо не рассматриваются вообще. В нашей стране примерно 30 лет назад сформировалось новое научное направление «трибофатика» [2], основная задача которого заключалась в совместном исследовании взаимодействующих и взаимовлияющих явлений трения, износа и накопления усталостных повреждений вплоть до полного разрушения конструкций.

Естественно, что проектировщики прежде всего должны ответить на вопрос, достаточно ли прочность сцепления покрытия с основой, не происходит ли его отслоение при действии на поверхность контактных и касательных напряжений [3, с. 497–519]. Вместе с тем реальные конструкции подвержены комплексному воздействию пространственных силовых факторов, таких как растягивающие и сжимающие усилия, скручивающие и изгибающие моменты, и других, которые, в свою очередь, создают объемное напряженно-деформированное состояние деталей. Оценке влияния видов нагружения на усталостную долговечность образцов с покрытиями и посвящена данная статья.

По результатам проведенных ранее автором в Шеффилдском университете испытаний цилиндрических стальных образцов с термонапыленными порошковыми покрытиями на основе никель-хрома сделано заключение [4], что их усталостная долговечность при растяжении-сжатии «слегка выше», а при кручении «слегка ниже» аналогичных характеристик для стандартной среднеуглеродистой стали. Статистическая обработка данных экспериментов позволила установить следующие уравнения кривых усталости:

при растяжении-сжатии

$$\Delta\sigma = 2184,0 - 96,5 \cdot \log N; \quad (1)$$

при кручении

$$\Delta\tau = 837,7 - 96,5 \cdot \log N, \quad (2)$$

где $\Delta\sigma$ — размах нормальных напряжений в наименьшем поперечном сечении (\varnothing 8 мм) образца с покрытием, МПа;

$\Delta\tau$ — размах касательных напряжений в сечении того же размера, МПа;

N — число циклов нагружения до разрушения образца.

Вычисления показывают, что в диапазоне от тысячи до миллиона циклов нагружения усталостная долговечность образцов с покрытиями при растяжении-сжатии увеличивается в пределах 16–500 %, а при кручении уменьшается от 43 до 55 %.

Понятно, если при использовании покрытий на деталях машин одновременно со сниже-

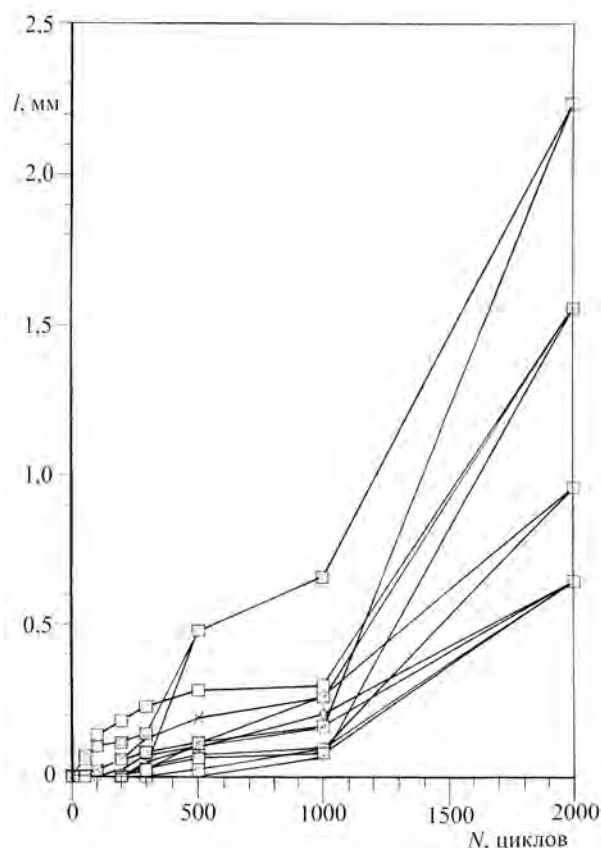


Рис. 1. Развитие двенадцати субтрещин, образующих магистральную поверхностную трещину на цилиндрическом образце с покрытием при высоких скручивающих нагрузках ($\Delta\tau = 498$ МПа, $N_f = 5100$ циклов)

нием износа наблюдается повышение прочности основного материала, проектировщикам нет повода для беспокойства. В противном случае требуется конструктивно-технологическая доработка для обеспечения заданного ресурса соединений и узлов.

Углубленный анализ параметров роста усталостных трещин и изломов образцов [5] показывает ряд отличительных особенностей разрушения при скручивающих нагрузках. Буквально после первых циклов нагружения микротрещины порядка 2–5 мкм возникают от всех пор на поверхности покрытия по направлениям действия главных напряжений от кручения ($\sim 45^\circ$ к продольной оси образца). Далее десятки субтрещин развиваются до слияния в поверхностные трещины, исчисляемые миллиметрами (рис. 1).

Разрушение покрытия по толщине слоя и переход к повреждению основного металла (стали) происходит в нескольких точках одновре-

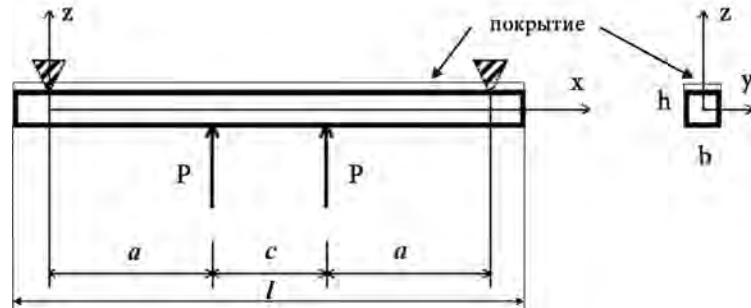


Рис. 2. Конструкция образца и схема нагружения

менно, что приводит к ускоренному развитию магистральной трещины и окончательному долóму образца.

Для оценки влияния изгибающих моментов на усталостную долговечность деталей машин с покрытиями проведены испытания прямоугольных образцов, вырезанных из листов биметаллического рессорного узла грузового автомобиля [6]. Конструкция образца и схема нагружения приведены на рис. 2.

Основной материал — пружинная сталь 60С2, материал покрытия — порошок ПГ-СР4. Средние размеры образцов: ширина $b = 4,6$ мм; высота $h = 6,5$ мм; длина $l = 8$ см, толщина покрытия — 0,5 мм. Так называемый четырехточечный изгиб образца создавался в специальном приспособлении на сервогидравлической испытательной установке с частотой нагружения 20 Гц при двух коэффициентах асимметрии $R = 0,1$ и $R = 0,7$. Прикладываемая к образцу сила $F = 2P$, изгибающий момент $M = P \cdot a$. Максимальное напряжение в опасном сечении определяется из выражения:

$$\sigma_{\max} \cdot I_x = M \cdot \frac{h}{2}, \quad (3)$$

где $I_x = M \cdot \frac{h}{2}$ — момент сопротивления сечения изгибу.

Таким образом, задаваемая сила вычисляется по уравнению:

$$F = \sigma_{\max} \cdot \frac{bh^2}{3a}. \quad (4)$$

Параметры оснастки в данном эксперименте: $c = 21,8$ мм, $a = 22,1$ мм. Длина трещин фиксировалась с помощью оптического микроскопа.

Фрагмент поверхности усталостного разрушения испытуемого образца показан на рис. 3.

На рис. 4 приведены результаты усталостных испытаний образцов с покрытиями и без покрытий.

Как видно из рис. 4, газопламенное нанесение твердосплавного порошкового покрытия снижает характеристики сопротивления усталости рессорной стали при изгибе. Это может объясняться негативным термическим влиянием технологического процесса напыления порошка, так как в серийном производстве листы рессор подвергаются объемной закалке и дробенаклепу, и вполне возможно повторный разогрев материала меняет характеристики поверхности. Следует отметить, что главное назначение покрытий в конструкциях рессорных подвесок грузовых автомобилей заключалось в снижении повреждающего действия фреттинг-процессов в зоне выхода листов из-под накладок центрального крепления рессор к балкам осей. В этих зонах контактируют номинально

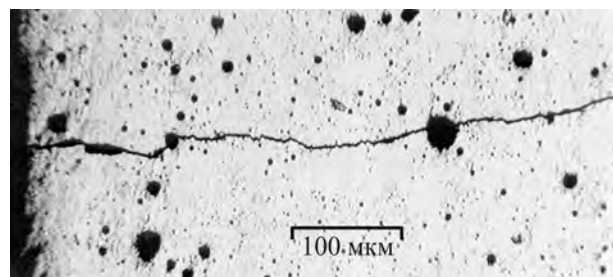


Рис. 3. Фотография траектории усталостной трещины на поверхности покрытия ПГ-СР4, зародившейся на боковой кромке и распространяющейся перпендикулярно продольной оси образца рессорной стали (затемненные фрагменты — это поры)

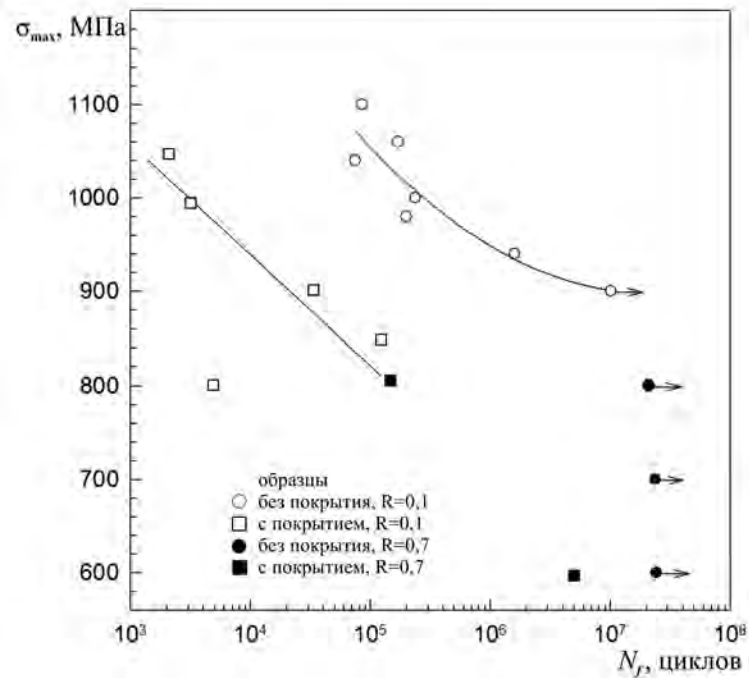


Рис. 4. Результаты усталостных испытаний при действии изгибающего момента на прямоугольные образцы рессорной стали 60С2 с поверхностным покрытием из порошка самофлюсующегося сплава ПГ-СР4 и без покрытия (точки со стрелочками обозначают неразрушенные образцы)

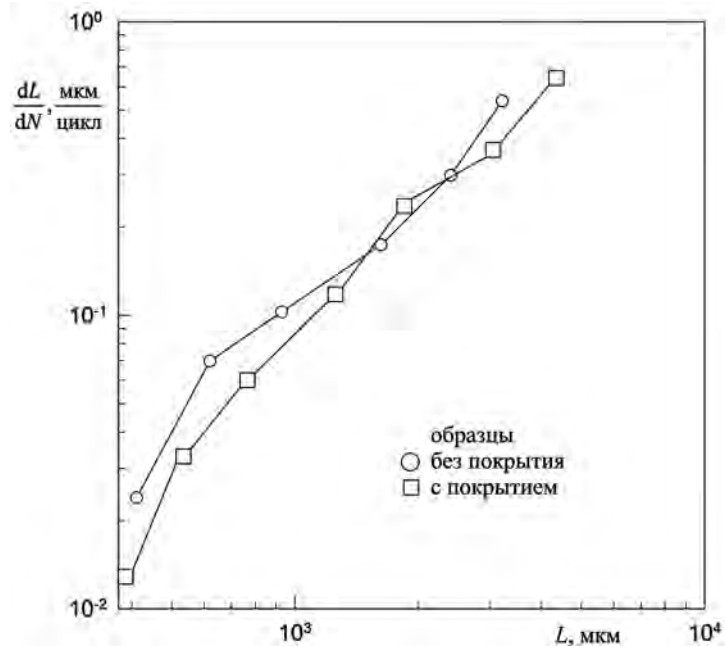


Рис. 5. Зависимости скорости роста усталостных трещин в прямоугольных образцах рессорной стали 60С2 с поверхностным покрытием из термонапыленного порошка ПГ-СР4 и без покрытия при действии изгибающего момента

неподвижные относительно друг друга поверхности, и поэтому, по границам контакта деталей значительные изгибающие моменты не

действуют, а износ листов вследствие небольших относительных перемещений и вибраций практически исключается. В итоге экс-

платационный ресурс подвески автомобиля существенно повышается. Заметно некоторое повышение характеристик сопротивления усталости при увеличении коэффициента асимметрии нагружения, что соответствует общепринятым закономерностям усталостного разрушения металлов.

Анализ скорости роста усталостных трещин в зависимости от достигнутой длины в двух выборках образцов показывает, что в зависимости имеют близкий к линейному характер (рис. 5).

При длине трещин на уровне десятых долей миллиметра покрытие затормаживает их развитие по сравнению с непокрытой сталью. После достижения длины трещины примерно одного миллиметра, скорости роста в обоих вариантах практически совпадают, что свидетельствует о прохождении повреждений через всю толщину покрытия при одном и том же механизме разрушения основного материала.

Резюмируя вышеприведенные результаты, а также данные предыдущих исследований автора образцов и деталей рессорной подвески автомобилей, можно сделать следующие выводы.

1. Современные материалы и технологии нанесения износостойких покрытий позволяют создавать комбинированные (двухслойные) детали и узлы, работающие как единое целое и воспринимающие все виды внешних циклических нагрузок.

2. Наиболее эффективным с точки зрения усталости является применение термонапыленных твердосплавных покрытий в зонах контактного взаимодействия практически неподвижных относительно друг друга деталей машин для снижения повреждающего действия фреттинг-процессов и последующего износа поверхностей.

3. При значительных деформациях и перемещениях неконтактирующих поверхностей действие внешних силовых факторов оказы-

вает существенное влияние на сопротивление усталости деталей вследствие хрупкого многоочагового разрушения покрытий.

4. При знакопеременном одноосном нагружении (растяжении-сжатии) образцов с покрытиями отмечается повышение характеристик сопротивления усталости по сравнению с однородными материалами.

5. В случае приложения скручивающих или изгибающих моментов наблюдается снижение усталостной долговечности комбинированных деталей, и поэтому для обеспечения заданного эксплуатационного ресурса проектировщикам надо отыскать баланс или компромисс между разными механизмами утраты работоспособности конструкции.

Литература:

1. Повышение ресурса трибосопряжений активированными методами инженерии поверхности / П. А. Витязь [и др.]. — Минск: Беларус. навука, 2012. — 452 с.
2. Сосновский, Л. А. Основы трибофатики. — Гомель: БелГУТ, 2003. — Т. 2. — 234 с.
3. Перспективные материалы и технологии / Под ред. В. В. Клубовича. — Витебск: ВГТУ, 2013. — 658 с.
4. Rakitsky, A. A. Fatigue resistance of a medium carbon steel with a wear resistant thermal spray coating / A. A. Rakitsky, E. R. de los Rios, K. J. Miller // *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. — 1994. — Vol. 17, No 5. — P. 563–570.
5. Rakitsky, A. A. Fractographic analysis of fatigue damage for steel specimens with a wear resistant thermal spray coating / A. A. Rakitsky, E. R. de los Rios, K. J. Miller // *Proceedings of III International Symposium in Tribo-Fatigue, 2000*. — Beijing, China: Hunan University Press, 2000. — P. 248–252.
6. Ракицкий, А. А. Эффективные пути снижения повреждающего действия фреттинг-процессов в силовых системах машин / А. А. Ракицкий // *Трибофатика: материалы V Междунар. симпозиума ISTF, Иркутск, 2004 г.: в 2 т. / ИрГУПС*. — Иркутск, 2005. — Т. 1. — С. 135–141.