

УДК 621.81+539.62

А. А. Ракицкий

Белорусский национальный технический университет, Министерство образования Республики Беларусь,
пр. Независимости, 65, 220013 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 296 34 77, arakitsky@bntu.by

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН С ТЕРМОНАПЫЛЁННЫМИ ПОРОШКОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО РАСТЯЖЕНИЯ/СЖАТИЯ

Выполнено обоснование технологии поверхностного упрочнения деталей машин в целях повышения усталостной долговечности конструкций. Исследовано влияние термонапылённого порошкового никель-хромового покрытия на сопротивление усталости среднеуглеродистой стали. Проведены испытания на растяжение/сжатие цилиндрических образцов, которые показали неравномерное увеличение ресурса при выбранных параметрах нагружения и технологии упрочнения. Детально изучена и обсуждена область малоциклового усталости при действии близких к пределу текучести основного материала нормальных напряжений, в которой рост числа циклов до разрушения комбинированного образца достигает пятикратного значения. Доказано, что стальной образец с твёрдым покрытием работает как единое целое, и, несмотря на хрупкое трещинообразование, его усталостная долговечность существенно повышается.

Ключевые слова: термонапылённое порошковое покрытие; сопротивление усталости; скорость роста трещин; усталостная долговечность; хрупкое трещинообразование.

Рис. 5. Библиогр.: 4 назв.

A. A. Rakitsky

Belarusian National Technical University, Ministry of Education of the Republic of Belarus,
65, Nezavisimosty ave., 220013 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 296 34 77, arakitsky@bntu.by

INVESTIGATION OF FATIGUE STRENGTH OF MACHINE COMPONENTS WITH THERMAL SPRAY COATINGS UNDER CYCLIC PUSH/PULL CONDITIONS

A substantiation of a surface-strengthening technology of machine components for structures endurance increase was implemented. The influence of a thermal spray powder Ni-Cr-base coating on a medium carbon steel fatigue resistance was investigated. Fully reversed push/pull tests of mild hour-glass profile specimens were carried out which showed an irregular increasing of a durability under chosen loading parameters and strengthening technology. A low cycle fatigue field under close to the yield limit stresses was studied and discussed in detail where a growth of number cycles to failure for a combined specimen runs up to a value divisible by five. It is proved that a steel specimen with a hard coating works as the indivisible whole and in spite of a brittle-type cracking its fatigue endurance increases essentially.

Key words: thermal spray powder coating; fatigue resistance; crack growth speed; fatigue endurance; brittle-type cracking.

Fig. 5. Ref.: 4 titles.

Введение. Большинство изделий машиностроения эксплуатируются в условиях многоциклового нагружения, и их ресурс определяется характеристиками сопротивления усталости элементов конструкции. Интенсивность накопления усталостных повреждений и наступления предельного состояния — разрушения изделия — определяется множеством взаимосвязанных и взаимодействующих факторов: технологических, конструкционных, эксплуатационных и т. д. Как правило, усталостные трещины зарождаются от поверхностных дефектов, особенно в зонах контакта деталей и узлов, где происходят сложные процессы износа, фреттинг-усталости, питтинга и др.

Для комплексного решения проблемы повышения надёжности и долговечности изделий машиностроения по критериям износа и усталости в нашей стране в 1980-х годах сформировалось новое научное

направление — трибофатика (от греч. *tribos* трение, фр. *fatigue* усталость). Объединение опыта учёных и специалистов в смежных областях позволило разработать достаточно эффективные пути упрочнения поверхностей деталей машин, обеспечивающие существенное повышение ресурса сложных конструкций [1].

Выбор технологии поверхностного упрочнения. Обоснование применения упрочняющих покрытий на деталях конструкций для повышения их усталостной долговечности проведено на примере рессорных подвесок наземных мобильных машин: автомобилей, тракторов, прицепов, троллейбусов, трамваев, железнодорожного подвижного состава.

В зонах контактного взаимодействия элементов конструкций происходят сложные процессы трения, износа и накопления усталостных повреждений. Присутствие пыли, грязи и других твёрдых частиц в условиях эксплуатации интенсифицирует абразивное изнашивание деталей. Окружающая атмосфера вызывает протекание дополнительных электрохимических взаимодействий на поверхностях трения. Существенными активирующими факторами являются наличие вибраций различной частоты, внешних нагрузок и т. д. В любом случае в зонах контакта происходят нарушения фрикционных связей, которые можно разделить на следующие основные виды: микрорезание, пластические и упругие деформации, схватывание поверхностей, сопровождающееся глубинным вырыванием материала.

Для повышения износостойкости рабочих поверхностей, эксплуатирующихся в условиях абразивного изнашивания, необходимо обеспечить комплекс специфических, часто противоположных свойств: сопротивление сжатию и сдвигу, твёрдость и вязкость, концентрацию и равномерность распределения упрочняющих фаз. В машиностроении чаще всего в таких случаях увеличивают твёрдость контактирующих участков. Однако более перспективным представляется использование покрытий, которые обладают гетерогенной структурой, сочетающей высокую микротвёрдость дисперсных включений с износостойкой вязкой матрицей, препятствующей протеканию микрорезания. При этом для достижения максимальной износостойкости и замены механизма микрорезания трущихся поверхностей менее интенсивными процессами упругого или пластического сдвига к структуре упрочняющих слоёв предъявляются дополнительные требования. Так, расстояние между твёрдыми включениями структуры должно быть меньше среднего размера абразивных частиц, величина зёрен карбидов и боридов — достаточной для сопротивления абразивному изнашиванию, интенсивность которого уменьшается с ростом толщины твёрдых включений.

Повреждения поверхностей деталей являются очагами зарождения распространяющихся трещин, нарушающих целостность (сплошность) сечений и приводящих к утрате работоспособности или полному разрушению конструкций. При этом геометрические, физико-механические и другие параметры покрытий, а также наличие переходной зоны, несомненно, влияют на скорость роста усталостных макротрещин в матрицах. Таким образом, задача управления процессом контактного взаимодействия деталей состоит в правильном выборе и обосновании материалов, структуры, технологии нанесения покрытий с тем, чтобы исключить или замедлить накопление повреждений на всех стадиях зарождения и распространения трещин и, в конечном счёте, повысить ресурс несущей конструкции.

Среди достаточно большого многообразия методов нанесения покрытий для повышения долговечности листовых рессор выбрано газопламенное напыление порошков самофлюсующихся сплавов [2]. Суть процесса заключается в нагреве, распылении и ускорении частиц порошка в высокотемпературном газовом потоке. На поверхность изделия или основы напыляемый материал поступает в диспергированном состоянии в виде мелких расплавленных или пластифицированных частиц, которые ударяются, деформируются и, закрепляясь, накладываются друг на друга. При этом возможно возникновение трёх видов связей: механических, локализованной диффузии или сплавления, сил Ван-дер-Ваальса.

Высокая эффективность и универсальность данного метода определяются следующими принципиальными особенностями: 1) возможностью нанесения покрытий из различных материалов и в различных сочетаниях; 2) получением покрытий практически на любых элементах конструкций; 3) отсутствием деформации и существенного снижения прочности изделия, поскольку напыление не вызывает его значительного нагрева; 4) небольшой потребностью в порошках, так как толщина покрытия обычно составляет 100...500 мкм; 5) высокой производительностью и универсальностью применяемого оборудования.

Основное требование к наносимому на деталь покрытию — соответствие его параметров условиям эксплуатации изделия. Кроме того, материал покрытия должен обладать такими физико-химическими свойствами, которые обеспечивают совместимость со свойствами основы (матрицы).

Использованные в данной работе материалы — сплавы на основе никеля и хрома с добавлением бора и кремния. Они характеризуются тем, что после напыления могут быть оплавлены на воздухе. Образующиеся при их плавлении соединения бора и кремния связывают окислы никеля и хрома, а также железа, в стекловидные шлаки, всплывающие на поверхность оплавленного металла, и защищают его от дальнейшего окисления. При этом на детали образуется плотное мелкопористое покрытие.

Оплавленные покрытия из самофлюсующихся сплавов обладают высокой износостойкостью в условиях абразивного и эрозионного изнашивания. Они отличаются высокой химической стойкостью к окислению, в том числе при повышенных температурах и в агрессивных средах, способностью удерживать граничные слои смазки и локализовать пластические деформации в поверхностных слоях. Вместе с тем самофлюсующиеся сплавы имеют малую ударную вязкость и высокий коэффициент термического расширения. Поэтому после оплавления для предотвращения растрескивания покрытия необходимо медленное охлаждение, например, на воздухе.

Снижение пористости покрытий, а также повышение прочности сцепления с основным материалом может достигаться в режиме припекания с приложением активирующего давления. В этом случае вместо оплавления используется нагрев до более низкой температуры, что снижает опасность разупрочнения матрицы, и производится обжатие поверхностного слоя.

Материалы и методы исследования. Для проверки предложений по упрочнению стальных деталей машин методом газотермического напыления порошковых материалов проведены усталостные испытания образцов различных форм и размеров при знакопеременном растяжении/сжатии на универсальной сервогидравлической установке фирмы Schenk с усилием 50 кН (рисунок 1).

Образцы изготавливались из прутка среднеуглеродистой стали, химический состав которой следующий (в весовых процентах): 0,4% С; 0,95% Cr; 0,6% Mn; 0,2% Si; 0,15% Ni; остальное — феррит. Механические свойства основного материала определены при статических нагрузках: предел текучести — 647 МПа, предел прочности — 892 МПа, твёрдость — НВ 229. Центральная (вогнутая) часть образца получена точением с последующим дробенаклёпом для лучшего сцепления с покрытием.

Материал покрытия — никель-хромовый самофлюсующийся сплав, имеющий химический состав (в весовых процентах): 0,6% С; 12,5% Cr; 4,5% Fe; 4,0% Si; 75,5% Ni; 2,9% В. Использовался порошок в виде сферических частиц размерами 40...100 мкм. Для увеличения адгезии износостойкого слоя с основным материалом первоначально наносился связующий молибденовый подслои в несколько микрон. Молибден прочно соединяется со сталью, и его шероховатая поверхность обеспечивает надёжное сцепление с последующим слоем. Затем газопламенным способом с помощью установки порошковой термораспылительной (УПТР) на вращающийся в шпинделе токарного станка образец напылялось никель-хромовое покрытие толщиной порядка 0,5 мм, которое оплавлялось с помощью горелки при температуре выше 1 000°C. Окончательно рабочая поверхность образца шлифовалась и полировалась. Средняя твёрдость покрытия составила 50 HRC.

Микроструктура наименьшего сечения образца (см. рисунок 1) исследовалась с помощью электронного микроскопа SEM Philips 500. При данной технологии изготовления пористость получаемого покрытия как на поверхности образцов, так и по глубине составила порядка 10%. Измерения микротвёрдости компонентов покрытия по Виккерсу показали существенно различные результаты от 300 до 1 000 HV (при микротвёрдости зёрен матрицы порядка 200 HV).

Для обнаружения зарождения усталостных трещин и регистрации их размеров использовался метод «реплик». В качестве датчика применялась прозрачная плёнка толщиной 35 мкм из ацетата целлюлозы. Техника эксперимента состоит в следующем. Лист репликационного материала разрезается на полоски необходимых размеров порядка 10 × 20 мм. Поверхность исследуемого образца смачивается ацетоном, и на выбранный его участок пинцетом накладывается вырезанная полоска. За счёт реакции с ацетоном и размягчения последняя плотно прилегает к поверхности металла, точно копируя его форму. Спустя несколько минут «реплика» высыхает и легко снимается с образца. На ней зеркально

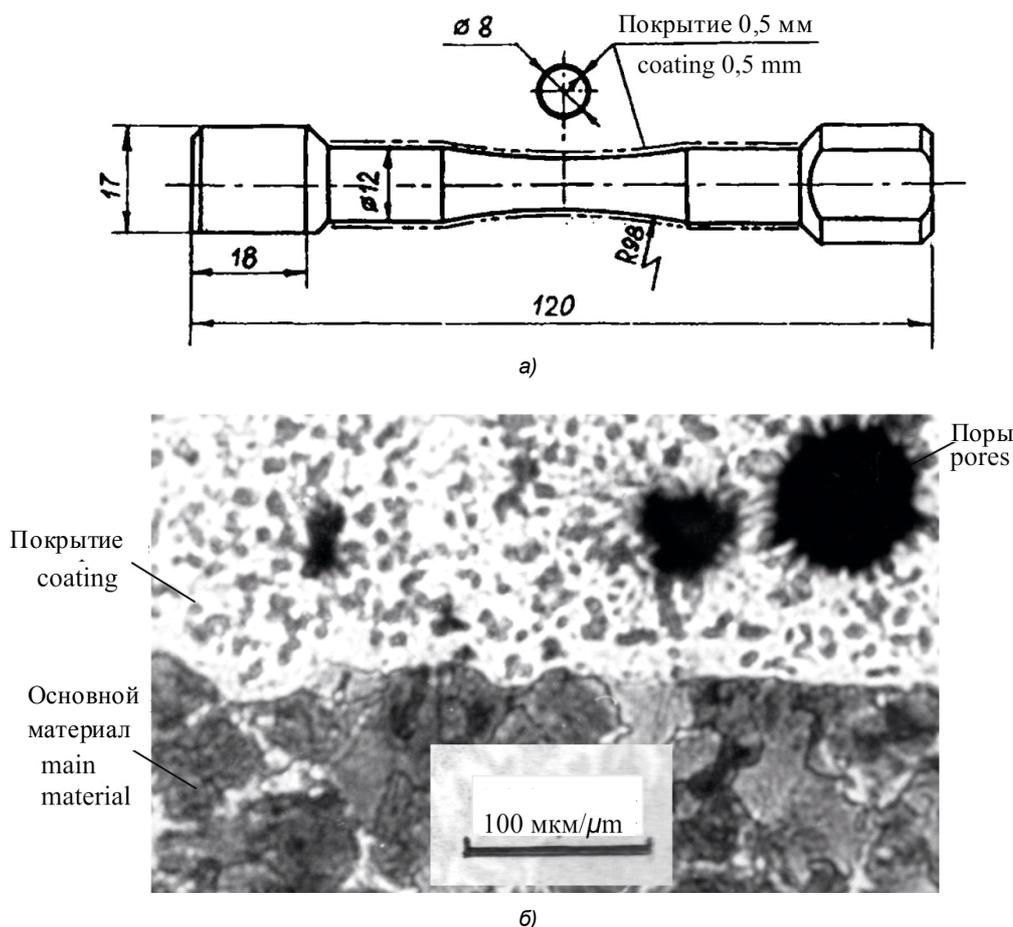


Рисунок 1. — Геометрия (а) и микроструктура (б) образца

отображается весь рельеф поверхности: дефекты, включения, трещины и т. п. Затем плёнка закрепляется с помощью клеящей ленты на стекло, образуя слайд, готовый для наблюдения под микроскопом.

Реализация метода «реплик» возможна только в статическом состоянии образца, при этом для уверенного обнаружения и измерения дефектов необходимо зафиксировать нагружающее устройство стенда в экстремальном положении цикла, т. е. при действии максимальных напряжений (деформаций) и, соответственно, при максимальном раскрытии трещин. Число остановок стенда для контроля зависит от особенностей поставленной задачи. Обычно используют 15...20 реплик в течение наработки образца до разрушения, что позволяет достаточно точно описать зависимости скорости роста усталостных трещин. Мониторинг зарождения и развития дефектов осуществлялся с помощью аппаратно-программной системы, которая включает в себя оптический микроскоп, видеокамеру, аналого-цифровые преобразователи и персональный компьютер. Оптическое изображение «реплики», которое исследователь наблюдает в окуляре микроскопа, фотографируется видеокамерой и с помощью преобразователей превращается в электронные цифровые сигналы, передаваемые в память компьютера. Изображение «реплики» на экране монитора компьютера может быть очерчено цветным лучом, управляемым мышью, при этом возможно описать точки, линии и площади любой формы. Пакет программ позволяет автоматически вычислять любые статистические характеристики дефектов, касающихся их геометрии.

Результаты исследования и их обсуждение. При анализе результатов ранее проведённых исследований сопротивления усталости среднеуглеродистой стали с износостойкими термонапылёнными покрытиями [3] сделано заключение, что при знакопеременном растяжении/сжатии их циклическая долговечность слегка повышается по сравнению с теми же показателями для стали без покрытия. Статистическая обработка данных эксперимента позволила установить следующую зависимость:

$$\Delta\sigma = 2184,0 - 315,8 \cdot \log N,$$

где $\Delta\sigma$ — размах нормальных напряжений в наименьшем поперечном сечении образца с покрытием, МПа;
 N — число циклов нагружения до разрушения образца.

Вычисления показывают, что циклическая долговечность образцов с нанесённым покрытием изменяется существенно: при относительно низком размахе напряжений 400 МПа рост числа циклов до разрушения составляет 16%, а при высоком ($\Delta\sigma$ равно 1 000 МПа) — увеличивается примерно в 5 раз. Исходя из вышесказанного, отметим, что особый интерес представляет детальное изучение поведения комбинированных материалов в области малоциклового усталости.

Анализ «реплик», снятых с поверхности испытуемого образца, показывает, что при высоких растягивающих/сжимающих нагрузках буквально после первых циклов наработки в покрытии образуются множество микротрещин по наименьшему диаметру образца (обозначены стрелками на рисунке 2).

Далее они объединяются в макротрещину, развиваясь в глубь опасного сечения и приводя к окончательному разрушению образца. Вышесказанное хорошо иллюстрируется графиками (рисунок 3).

Первые 400...500 циклов наблюдаются несколько субтрещин, исчисляемых микронами. От 700 до 1 500 циклов длина некоторых из них достигает значений 0,5...3,5 мм. В диапазоне от 2 000 до 3 000 нагружений скорость роста двух трещин 1 и 2 резко возрастает, а далее большинство трещин стремительно увеличиваются в размерах, сливаются, вплоть до полного разрушения образца, наступившего при наработке 5 165 циклов. Вычисление скоростей роста всех зафиксированных при испытаниях (порядка двух десятков) трещин в зависимости от их длины показывает широкий разброс значений от сотых долей до нескольких микрон за цикл, что отражает отсутствие строгой математической зависимости этих факторов между собой в данном эксперименте (рисунок 4).

Вместе с тем, если анализировать изменение скорости роста каждой отдельной трещины, можно отметить четыре характерные зоны (рисунок 5).

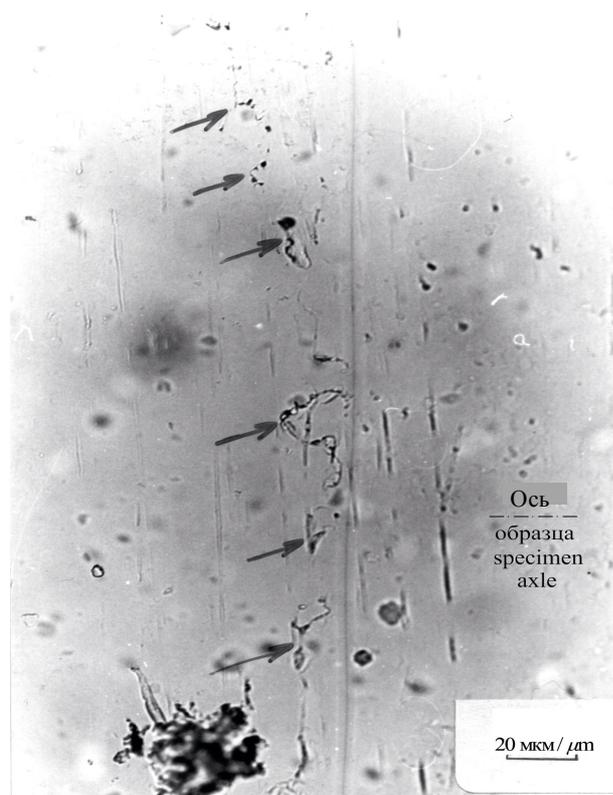


Рисунок 2. — Несколько микротрещин на поверхности образца с покрытием перед их объединением в макротрещину при $\Delta\sigma$, равном 998 МПа

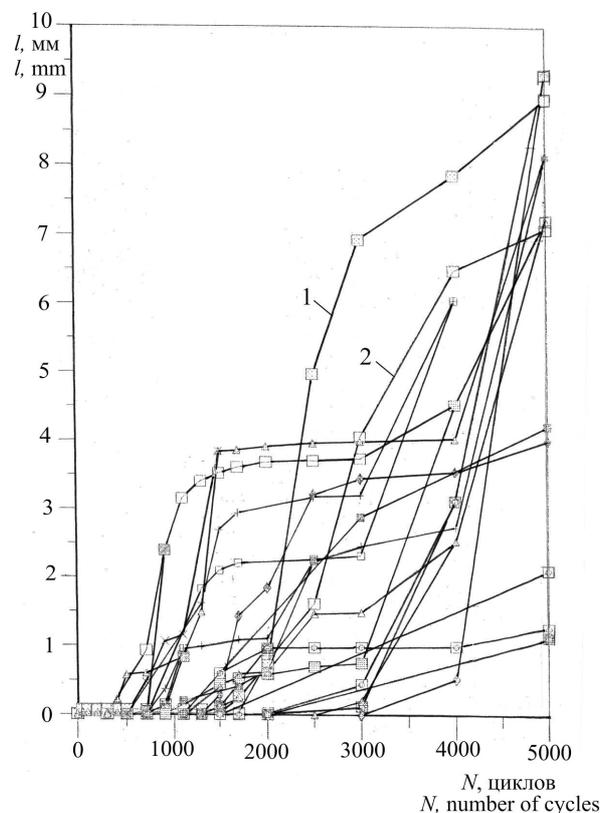


Рисунок 3. — Зависимость длины развивающихся усталостных трещин от наработки покрытого образца в циклах

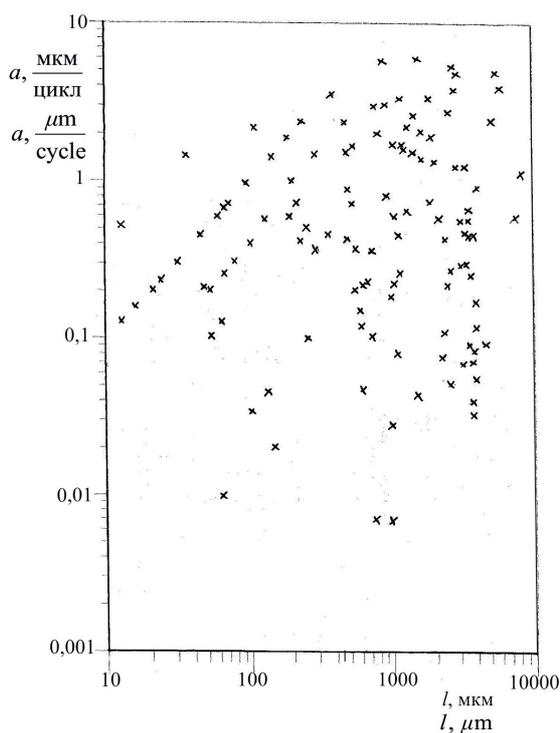


Рисунок 4. — Поле рассеяния скоростей роста усталостных трещин на поверхности покрытия при высоких нормальных напряжениях от растяжения/сжатия образца

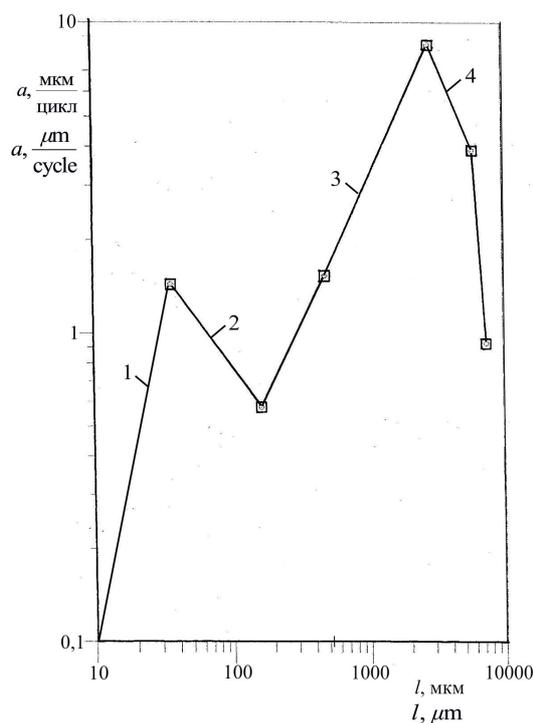


Рисунок 5. — Зависимость скорости роста трещины от её длины на поверхности образца с покрытием в области малоциклового усталости $\Delta\sigma$, равном 998 МПа, N_f — 5 165 циклов

После хрупкого образования и распространения трещины до одного-двух десятков микрон (линия 1) удлинение её на поверхности замедляется (линия 2), так как накапливаемая энергия разрушения идёт на развитие повреждения в глубь твёрдого покрытия вплоть до перехода к основному металлу (матрице). Далее происходит быстрое межзёрненное разрушение более мягкого материала — среднеуглеродистой стали (линия 3). При достижении поверхностной трещины длины порядка 2...3 мм скорость роста снова снижается (линия 4), вследствие, по-видимому, взаимного влияния других, параллельно растущих трещин, так как энергия разрушения расходуется, в своём роде перераспределяется, на несколько участков усталостного повреждения.

Заключение. В результате проведённых исследований показана возможность и эффективность применения термонапылённых порошковых покрытий для упрочнения деталей машин, ресурс которых лимитируется усталостными разрушениями. Правильным выбором материалов и технологий изготовления достигается сопротивление внешним растягивающим и сжимающим нагрузкам биметаллического соединения как единого целого.

Список цитируемых источников

1. Ракицкий А. А. Эффективные пути снижения повреждающего действия фреттинг-процессов в силовых системах машин // Трибофатика : Труды V Международного симпозиума по трибофатике, 3—7 октября 2005 г. Иркутск, 2005. Т. 1. С. 135—141.
2. Белоцерковский М. А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий : монография. Минск : Технопринт, 2004. 200 с.
3. Rakitsky A. A., de los Rios E. R., Miller K. J.: 1) Fatigue resistance of a medium carbon steel with a wear resistant thermal spray coating // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. 1994. Vol. 17. No 5. P. 563—570 ; 2) Fractographic analysis of fatigue damage for steel specimens with a wear resistant thermal spray coating // Proceedings of III International Symposium in Tribo-Fatigue, 2000. Beijing, China : Hunan University Press, 2000. P. 248—252.

Поступила в редакцию 26.04.2016.