

УСТАНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ ПОКРЫТИЙ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

© 2019

А.Н. Венедиктов, кандидат технических наук
Н.Л. Венедиктов, кандидат технических наук, доцент
Тюменский индустриальный университет, Тюмень (Россия)

Ключевые слова: электролитические покрытия; усталостные испытания; усталость покрытий; напряжения в покрытиях; переменные нагрузки.

Аннотация: В процессе эксплуатации детали с нанесенными на них покрытиями часто испытывают нагрузки переменного характера, что сказывается на сроке службы изделий. Исследованию усталостных свойств таких изделий посвящено достаточно много работ, однако изучение влияния переменных нагрузок на структуру и свойства самих покрытий имеет разрозненный характер. Поскольку определение характеристик сопротивления усталости образцов с нанесенными на них покрытиями до сих пор является актуальным, целью исследования являлась разработка конструкции установки для испытаний на усталость и разработка методики испытаний образцов с покрытиями в режиме переменных нагрузок.

Для отработки методики испытаний на усталость была разработана установка оригинальной конструкции. При проектировании установки учитывалось, что нагружение образца должно производиться равномерно, чтобы материалы основы и подложки испытывали напряжения, постоянные по всей длине образца.

С помощью аналитического решения задачи прочности была разработана методика определения напряжений в покрытии и подложке. Для подтверждения справедливости использования предложенной методики использовали численные методы. С этой целью решали задачу нахождения напряжений в образце, состоящем из двух слоев материалов, с помощью программы *Comsol Multiphysics* в двумерной постановке.

В результате проделанной работы разработана конструкция экспериментальной установки для испытаний образцов с покрытиями с максимальной растягивающей силой 5000 Н и возможностью плавного изменения частоты колебаний.

Разработана и апробирована методика испытания образцов с покрытиями без отделения последних от подложки. Показано, что применение описанной методики справедливо, если толщина покрытия составляет не более 7 % от толщины подложки.

ВВЕДЕНИЕ

Способы оценки надежности и качества покрытий, эксплуатируемых при постоянных нагрузках, хорошо изучены [1–3]. Однако в процессе эксплуатации детали с нанесенными на них покрытиями часто испытывают нагрузки переменного характера, что не может не сказываться на сроке службы изделий [4–6]. Исследованию усталости систем «основной металл – покрытие» посвящено достаточно много работ [7–9]. Механизмы зарождения трещины в композиции «основа – покрытие» при циклическом нагружении широко рассмотрены в работах [10; 11].

Предполагается, что одной из причин трещинообразования может быть следующее явление: покрытие блокирует дислокации в поверхностном слое основного металла и затрудняет развитие пластической деформации. При нагружении дислокации начинают перемещаться, и у границы «основа – покрытие» образуются скопления краевых дислокаций, вызывая появление растягивающих напряжений, которые, в свою очередь, могут стать причиной образования микротрещин.

Другой причиной трещинообразования служит то, что появление и распространение трещин может происходить непосредственно от поверхности покрытия, на которой всегда имеются готовые концентраторы напряжений в виде пор, несплошностей, играющих роль источника трещин [10]. В целом, металлопокрытия, нанесенные электролитическим методом, снижают усталостные характеристики [12; 13], причем коэффициент

снижения предела выносливости пропорционален толщине покрытия.

Что касается характеристик сопротивления усталости самого покрытия без основы – в настоящее время по имеющимся типовым методикам без экспериментальных испытаний их рассчитать нельзя. Это связано прежде всего с анизотропией механических свойств по поперечному сечению и наличием остаточных напряжений в приповерхностных слоях основного металла и покрытия [14]. Как следствие, изучению влияния переменных нагрузок на структуру и свойства самих покрытий уделяется мало внимания, и оно имеет разрозненный характер [15].

Еще одним фактором, обуславливающим сложившуюся ситуацию, является сложность и высокая стоимость специализированного оборудования, выпускаемого серийно [16–18], позволяющего проводить усталостные испытания образцов малого поперечного сечения с применением микроперемещений и маленьких нагрузок, используемых в процессе испытаний. Кроме того, отделение покрытия от основы и испытание его на усталость практически не представляется возможным или сопряжено с очень большими трудностями [2]. В связи с этим в настоящее время имеется потребность в разработке метода оценки внутренних напряжений, возникающих в покрытии в процессе испытания. Определение характеристик сопротивления усталости образцов с нанесенными на них покрытиями до сих пор является актуальным, а специальных машин и методик

для проведения соответствующих испытаний практически нет.

Цель исследования – разработка конструкции установки для усталостных испытаний образцов с покрытиями и методики их испытания.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Образцы представляли собой пластины из нержавеющей стали с нанесенными на них электролитическими покрытиями. Площадь поперечного сечения не превышала 5 мм². При разработке установки учитывалось, что напряжения, возникающие в ходе испытания в материале покрытия и подложки, должны быть постоянными по всей длине образца. На основе анализа известных схем нагружения [1; 18] была выбрана схема с повторно-переменным растяжением, как наиболее удовлетворяющая вышесказанному условию. Требования к конструкции установки были сформулированы исходя из размеров испытываемых образцов и режимов проведения испытаний.

Поскольку проведение испытаний должно проходить в области упругой деформации, т. е. максимальная растягивающая нагрузка не должна вызывать напряже-

ний, превышающих предел текучести одного из материалов – покрытия или подложки, то для заданной геометрии образцов установка рассчитывалась для нагрузок до 5 кН. Установка проектировалась на проведение испытаний на многоцикловую усталость с числом циклов до 10⁷ с частотами не менее 10 Гц. Амплитуда колебаний должна быть стабильной в течение всего испытания, а также должна быть возможность плавного ее изменения [19–21].

Установка (рис. 1) состоит из вибратора 5, который может совершать возвратно-поступательные колебания в соосно расположенных неподвижных опорах на линейных шариковых подшипниках 4. К верхней части вибратора 5 крепится последовательно посредством захватов 3 образец 2 и тензометрический динамометр 1. Свободный конец динамометра закреплен неподвижно. Нижний конец вибратора крепится к пружине 9, которая, в свою очередь, крепится к неподвижной опоре посредством винта 10. Вращение винта позволяет создавать и плавно изменять преднагрузку образца. Пружина 9 необходима для возможности плавного регулирования предварительной нагрузки и гашения вибраций в ходе циклов нагружения-сжатия в пределах

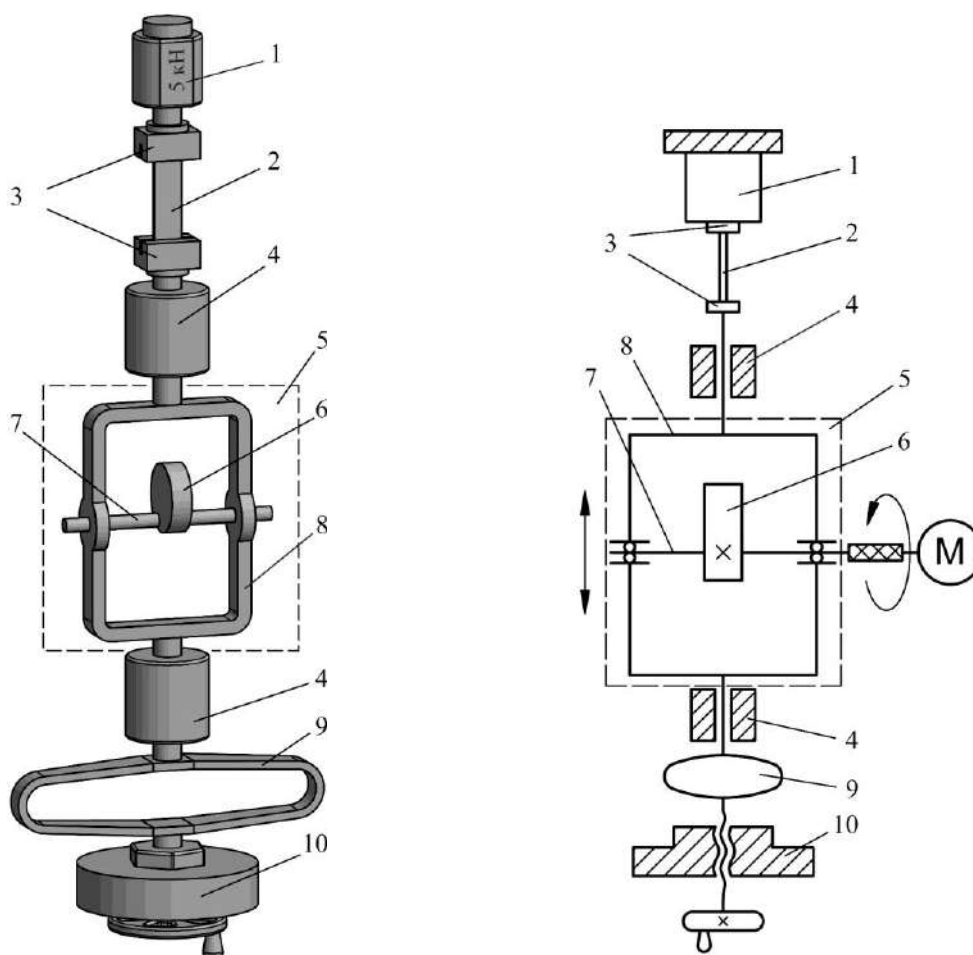


Рис. 1. Внешний вид и кинематическая схема установки:

- 1 – тензометрический динамометр; 2 – образец; 3 – захваты;
4 – верхняя и нижняя направляющие; 5 – вибратор; 6 – эксцентриковая масса;
7 – вал; 8 – корпус вибратора; 9 – пружина; 10 – механизм нагружения образца

упругой деформации. Коэффициент жесткости и длина хода пружины подобраны таким образом, что изменение длины образца в пределах упругой зоны намного меньше длины упругой деформации пружины. Это позволяет не принимать во внимание изменение растягивающей силы пружины из-за изменения ее длины согласно закону Гука.

Вибратор (рис. 1) необходим для циклического изменения действующей на образец силы F с максимальной амплитудой F_{max} . Вибратор состоит из корпуса δ , в котором на подшипниковых опорах вращается вал 7 , причем ось вращения вала расположена перпендикулярно оси, вдоль которой может перемещаться вибратор. На валу закреплена эксцентриковая масса $б$, представляющая собой груз, ось инерции которого, проходящая через цент масс, не совпадает с осью вращения вала. Вал приводится во вращение электродвигателем постоянного тока посредством гибкой муфты. Предусмотрена возможность плавной регулировки частоты вращения двигателя. Принцип работы состоит в следующем: на начальном этапе образец крепится в захватах. Вращением винта 10 задается начальная нагрузка, создающая в образце напряжения, не превышающие предел текучести материалов покрытия и подложки. Устанавливается определенная частота вращения электродвигателя, приводящего в движение вал. За счет разбалансировки на валу возникает центробежная сила, создающая амплитуду действующих на образец сил. Поскольку вибратор имеет возможность передвигаться поступательно только вдоль одной оси в опорах 4 , это приводит к возникновению циклически действующей на образец силы, изменяющейся по синусоидальному закону с частотой вращения вала вибратора в дополнение к начальной.

Для подтверждения справедливости использования методики определения напряжений в покрытии использовали численные методы. С этой целью решали задачу нахождения напряжений в образце, состоящем из двух слоев материалов, причем толщина слоя моделирующего покрытия была значительно меньше толщины слоя основы. Проскальзывание между материалами отсутствовало. Задача решалась с помощью программы *Comsol Multiphysics* в двумерной постановке, ширина образца условно равнялась единице.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Разберем динамические особенности работы вибратора.

Частота и амплитуда действующей на образец силы F_{max} связаны формулой:

$$F_{max} = m \cdot \omega^2 \cdot R = k \cdot \omega^2,$$

где m – масса груза на валу, кг;

ω – круговая частота, равная $2\pi n$;

n – частота вращения вала, об/с;

R – расстояние до центра масс груза, м;

k – коэффициент, характеризующий параметры вала вибратора.

Расчеты для груза с массой 100 г, центр масс которого находится на расстоянии 5 см от оси вала, и частотой колебаний 3000 циклов в минуту показали, что ампли-

туда циклически действующей силы будет составлять около 490 Н. В применяемых образцах такая сила будет создавать напряжения порядка 100 МПа. Этого достаточно для проведения испытаний такого рода, учитывая возможность изменения амплитуды как в меньшую, так и в большую сторону [2; 22]. Следует отметить, что при частотах и амплитудах, используемых при испытаниях, график нагружения представлял из себя практически идеальную синусоиду, что свидетельствует о достаточной динамической устойчивости установки.

Для проведения усталостных испытаний желательно, чтобы была возможность изменять амплитуду действующей силы, не затрагивая при этом частоту колебаний. Однако из формулы следует, что амплитуда силы пропорциональна как n , так и произведению m на R (коэффициент k). Значит, для изменения силы при постоянной частоте вращения вала необходим вал с другими значениями массы m и/или расстоянием до центра масс груза R .

Таким образом, амплитуда колебаний вибратора при заданной частоте вращения будет полностью определяться коэффициентом k .

Помимо осевых сил, в установке во время вращения вала присутствуют силы, действующие не вдоль оси нагружения. При определенных частотах это может приводить к возникновению нежелательного резонанса всей установки, что требует учитывать при её конструировании. Особые требования предъявляются к направляющим, которые должны выдерживать значительные динамические нагрузки.

Зная изменение силы, действующей на образец с течением времени, для однородного образца несложно найти напряжения, возникающие в материале, необходимые для вычисления характеристик сопротивления усталости. Однако для изучения свойств образцов с покрытиями приходится иметь дело с системой «покрытие – подложка», состоящей минимум из двух материалов. Напряжения в покрытии и основе, вызванные нагрузкой, в этом случае отличаются [23].

Отделение покрытия от основы связано с определенными трудностями [5], и поэтому очень сложно провести испытания одного покрытия, в связи с чем для вычисления характеристик усталости материала покрытия приходится прибегать к косвенным методам [24; 25].

Ранее в работе [2] с учётом, что деформация всего образца – как покрытия, так и подложки – одинаковая, и с применением закона Гука были установлены зависимости напряжений от площадей поперечного сечения, нагрузки и констант упругости (модуль Юнга E и коэффициент Пуассона μ) в материале покрытия и основы:

$$\sigma_{(1)} = \frac{E_1 \cdot A \cdot B \cdot F}{E_1 \cdot A \cdot B \cdot b \cdot t_1 + E_2 \cdot C \cdot D \cdot b \cdot t_2}, \quad (1)$$

$$\sigma_{(1)} = \frac{E_1 \cdot C \cdot D \cdot F}{E_1 \cdot A \cdot B \cdot b \cdot t_1 + E_2 \cdot C \cdot D \cdot b \cdot t_2}, \quad (2)$$

где t_1, t_2 – толщина покрытия и основы соответственно;

b – ширина образца;

F – растягивающая сила;

E_1, E_2 – модуль Юнга для покрытия и основы;

$$A = 1 + \mu_1^2; B = (1 - \mu_2)^2; C = 1 + \mu_2^2; D = (1 - \mu_1)^2;$$

μ_1, μ_2 – коэффициент Пуассона для покрытия и подложки соответственно.

Однако получаемые по формулам (1) и (2) значения отражают средние значения напряжений в материале [26].

Численным методом были рассчитаны напряжения, возникающие в образце при растяжении. Модельный образец представлял собой стальную пластинку толщиной 0,7 мм с нанесенным электролитическим хромом толщиной 0,05 мм, что составляло 7 % от толщины образца (рис. 2). Проскальзывание между покрытием и основой отсутствовало. Напряжения создавались с помощью растягивающей силы F , равной 1000 Н и приложенной к основе, что обусловило появление изгибающих напряжений.

На рис. 3 цветом показаны напряжения в образце, возникающие при действии растягивающей силы вдоль вертикальной оси, а также график изменения растягивающих напряжений по толщине образца l и значения 2 , полученные с использованием формул (1) и (2).

Результаты расчетов показывают, что среднее напряжение, возникающее в покрытии, равняется 1480 МПа,

что совпадает со средним значением, полученным аналитически из выражений (1) и (2). Хотя напряжения в покрытии и разные по всей толщине, погрешность их значений составляет ± 30 МПа, что соответствует 2 % от величины средних напряжений. Эта величина сопоставима с погрешностью измерений, и, как следствие, полученные выше аналитические выражения могут быть использованы для определения напряжений в покрытии.

Иная картина наблюдается, если покрытие имеет большую толщину относительно подложки. Увеличим толщину покрытия в 3 раза, до 0,15 мм, что соответствует 21 % от толщины подложки. Напряжения в покрытии в этом случае составят 795 ± 175 МПа, а отклонения от среднего значения, соответственно, 22 %, что не может считаться удовлетворительным результатом в испытаниях такого рода.

Моделирование величины внутренних напряжений еще раз подтвердило справедливость аналитически полученных выражений (1) и (2), но только в том случае, если образец имеет толщину основы, в несколько раз превышающую толщину осажденного покрытия.

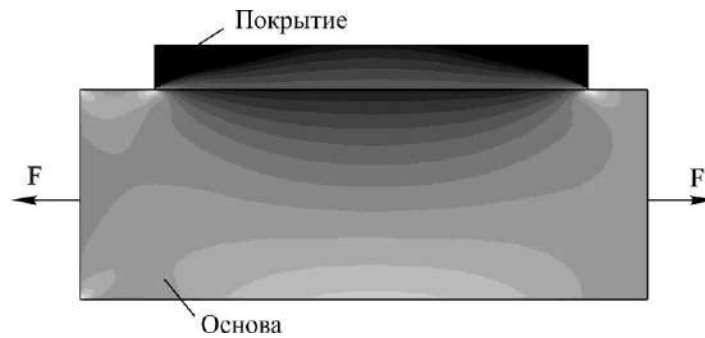


Рис. 2. Экспериментальный образец (цветом показан характер распределения напряжений в проекции на горизонтальную ось)

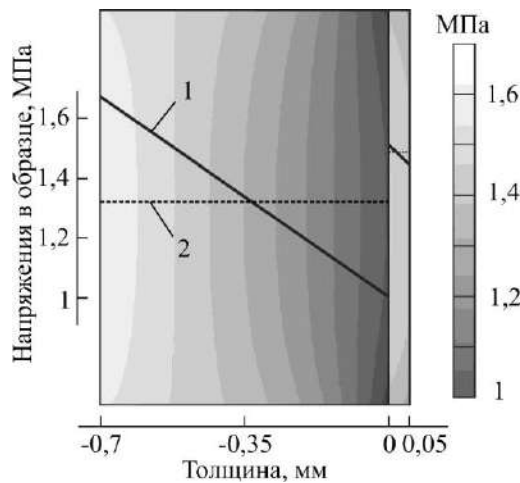


Рис. 3. Распределение напряжений в образце хрома на стальной подложке:

- 1 – значения, полученные численным методом;
- 2 – значения, полученные с помощью формул (1) и (2)

Использование этих выражений оправдано в том случае, если отношение толщины покрытия к толщине подложки не превосходит 7 %, поскольку только в этом случае можно не учитывать изменение напряжений по толщине покрытия.

Таким образом, предложенная установка может быть использована для определения растягивающих напряжений в покрытии при усталостных испытаниях без отделения покрытия от подложки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана конструкция экспериментальной установки для испытаний образцов с покрытиями с максимальной растягивающей силой 5000 Н и возможностью плавного изменения частоты колебаний.

2. Показано, что применение аналитически полученных выражений оправдано, если толщина покрытия составляет не более 7 % от толщины основы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тушинский Л.И., Плохов А.В., Токарев А.О., Синдеев В.И. Методы исследования материалов. М.: Мир, 2004. 384 с.
2. Венедиктов Н.Л., Ковенский И.М., Черноморченко В.И. Экспериментальная техника и методика проведения испытаний гальванических покрытий при переменных нагрузках // Гальванотехника и обработка поверхности. 2014. Т. 22. № 3. С. 54–56.
3. Тушинский Л.И., Плохов А.В. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий. Новосибирск: Наука, 1986. 198 с.
4. Волков И.А., Коротких Ю.Г., Тарасов И.С., Шишулин Д.Н. Численное моделирование упругопластического деформирования и накопления повреждений в металлах при малоциклового усталости // Проблемы прочности. 2011. № 4. С. 147–165.
5. Ракицкий А.А. Исследование усталостной прочности деталей машин с термонапыленными порошковыми покрытиями в условиях циклического растяжения/сжатия // Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки. 2016. № 4. С. 62–67.
6. Ракицкий А.А. Влияние видов нагружения на усталостную долговечность деталей с износостойкими покрытиями // Новости науки и технологий. 2016. № 1. С. 3–7.
7. Ковенский И.М., Поветкин В.В. Испытания гальванических покрытий. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 136 с.
8. Tushinsky L., Kovensky I., Plokhov A., Sindeev V., Rechedko P. Coated Metal. Structure and Properties of Metal Coating Compositions. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2002. 458 p.
9. Нураков С., Белоцерковский М.А., Аяганова А.Ж. Исследование сопротивления усталости деталей с напыленными покрытиями // Новости науки Казахстана. 2017. № 1. С. 127–135.
10. Максимович Г.Г., Шатинский В.Ф., Копылов В.И. Физико-химические процессы при плазменном напылении и разрушении материалов с покрытиями. Киев: Наука думка, 1983. 264 с.
11. Чаевский М.И., Шатинский В.Ф. Повышение работоспособности сталей в агрессивных средах при

циклическом нагружении. Киев: Наука думка, 1970. 310 с.

12. Карпенко Г.В., Похмурский В.И., Далисов В.Б. Влияние диффузионных покрытий на прочность стальных изделий. Киев: Наука думка, 1971. 167 с.
13. Васильев В.И., Овсянников В.Е., Некрасов Р.Ю., Темпель Ю.А. Влияние режимов диффузионного поверхностного легирования на толщину упрочненного слоя деталей транспортно-технологических машин из серого чугуна // СТИН. 2018. № 5. С. 33–35.
14. Калмуцкий В.С. Прочность и надежность деталей с металлопокрытиями // Проблемы прочности. 1980. № 9. С. 96–101.
15. Волков И.А., Игумнов Л.А., Тарасов И.С. Оценка усталостной долговечности материалов и конструкций при малоциклового нагружении // Вычислительная механика сплошных сред. 2017. Т. 10. № 1. С. 17–30.
16. Побировский В.И. Установка для испытания материалов на выносливость при низких температурах // Проблемы прочности. 1972. № 12. С. 118–119.
17. Тушинский Л.И., Тихомирова Л.Б., Муратов В.М. Стенд для исследования поведения стали при циклическом нагружении // Заводская лаборатория. 1973. № 4. С. 491–492.
18. Ерпалов А.В., Шефер Л.А., Рихтер Е.Е., Тараненко П.А. Усталостные испытания материалов и конструкций с использованием современного оборудования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2015. Т. 15. № 2. С. 70–80.
19. Распопина В.Б., Хакимджанов Р.Р. Учебная машина WP для испытания образцов на усталость // Молодежный вестник ИрГТУ. 2016. № 1. С. 6.
20. She M., He G., Zhang H., Zhang F. Dynamic strain aging in 321 stainless steel during low cycle fatigue test // Tongji Daxue Xuebao. 2014. Vol. 42. № 9. P. 1391–1394.
21. Park J.H., Myung M.S., Kim Y.J. High cycle tensile and fatigue test for thin Al-3 % Ti films // Sensors and actuators. 2008. Vol. 147. № 2. P. 561–569.
22. Arefinkina S.E., Denisov R.A., Morozov A.A., Surin V.I. Relationship between deformational activity of the surface and electric properties of materials // Modern problems of theory of machines. 2016. № 4. P. 177–183.
23. Гоц А.Н. Расчеты на прочность при переменных напряжениях. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2012. 138 с.
24. Manoj V., Manohar Shenoy K., Gopinath K. Developmental studies on rolling contact fatigue test rig // Wear. 2008. Vol. 264. № 7-8. P. 708–718.
25. Tomaszewski T., Sempruch J. Verification of the fatigue test method applied with the use of mini specimen // Key Engineering Materials. 2014. Vol. 598. P. 243–248.
26. Венедиктов Н.Л., Венедиктов А.Н., Ковенский И.М. Испытания покрытий при переменных нагрузках // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2017. № 1. С. 95–98.

REFERENCES

1. Tushinsky L.I., Plokhov A.V., Tokarev A.O., Sindeev V.I. *Metody issledovaniya materialov* [Materials research methods]. Moscow, Mir Publ., 2004. 384 p.

2. Venediktov N.L., Kovensky I.M., Chernomorchenko V.I. Experimental methods for electrocoatings tests varying loads. *Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*, 2014, vol. 22, no. 3, pp. 54–56.
3. Tushinsky L.I., Plokhov A.V. *Issledovanie struktury i fiziko-mekhanicheskikh svoystv pokrytiy* [Study of the structure and physico-mechanical properties of coatings]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. 198 p.
4. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G., Tarasov I.S., Shishulin D.N. Numerical modeling of elastoplastic deformation and damage accumulation in metals under low-cycle fatigue conditions. *Strength materials*, 2011, vol. 43, no. 4, pp. 471–485.
5. Rakitsky A.A. Investigation of fatigue strength of machine components with thermal spray coatings under cyclic push/pull conditions. *Vestnik Baranovichskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 4, pp. 62–67.
6. Rakitsky A.A. Influence of loading conditions on a fatigue endurance for components with wear-resistant coatings. *Novosti nauki i tekhnologii*, 2016, no. 1, pp. 3–7.
7. Kovensky I.M., Povetkin V.V. *Ispytaniya galvanicheskikh pokrytiy* [Electroplating testing]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 2001. 136 p.
8. Tushinsky L., Kovensky I., Plokhov A., Sindeev V., Rechedko P. *Coated Metal. Structure and Properties of Metal Coating Compositions*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 2002. 458 p.
9. Nurakov S., Belotserkovsky M.A., Ayaganova A.Zh. Study of fatigue resistance of parts with sprayed coatings. *Novosti nauki Kazakhstana*, 2017, no. 1, pp. 127–135.
10. Maksimovich G.G., Shatinsky V.F., Kopylov V.I. *Fiziko-khimicheskie protsessy pri plazmennom napylenii i razrushenii materialov s pokrytiyami* [Physico-chemical processes during plasma spraying and destruction of coated materials]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1983. 264 p.
11. Chaevsky M.I., Shatinsky V.F. *Povyshenie rabotosposobnosti staley v agressivnykh sredakh pri tsiklicheskom nagruzhenii* [Improving the performance of steels in aggressive environments under cyclic loading]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1970. 310 p.
12. Karpenko G.V., Pokhmursky V.I., Dalisov V.B. *Vliyanie diffuzionnykh pokrytiy na prochnost' stalnykh izdeliy* [The effect of diffusion coatings on the strength of steel products]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1971. 167 p.
13. Vasil'ev V.I., Ovsyanikov V.E., Nekrasov R.Yu., Tempel' Yu.A. Influence of diffusional surface alloying on the hardenend-layer thickness for gray-iron machine parts. *Russian Engineering Research*, 2018, no. 5, pp. 33–35.
14. Kalmutskii V.S. Strength and reliability of parts with metal coatings. *Strength of Materials*, 1980, vol. 12, no. 9, pp. 1162–1169.
15. Volkov I.A., Igumnov L.A., Tarasov I.S. Evaluating fatigue life of materials and structures under low-cycle loading. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 17–30.
16. Pobirovskii V.I. A unit for fatigue testing of materials at low temperatures. *Strength of Materials*, 1972, vol. 4, no. 12, pp. 1539–1541.
17. Tushinsky L.I., Tikhomirova L.B., Muratov V.M. A stand for studying the behavior of steel under cyclic loading. *Zavodskaya laboratoriya*, 1973, no. 4, pp. 491–492.
18. Erpalov A.V., Shefer L.A., Rikhter E.E., Taranenko P.A. Fatigue tests of materials and structures using modern equipment. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 70–80.
19. Raspopina V.B., Khakimdzhanov R.R. Training equipment WP for fatigue test. *Molodezhnyi vestnik IrGTU*, 2016, no. 1, p. 6.
20. She M., He G., Zhang H., Zhang F. Dynamic strain aging in 321 stainless steel during low cycle fatigue test. *Tongji Daxue Xuebao*, 2014, vol. 42, no. 9, pp. 1391–1394.
21. Park J.H., Myung M.S., Kim Y.J. High cycle tensile and fatigue test for thin Al-3 % Ti films. *Sensors and actuators*, 2008, vol. 147, no. 2, pp. 561–569.
22. Arefinkina S.E., Denisov R.A., Morozov A.A., Surin V.I. Relationship between deformational activity of the surface and electric properties of materials. *Modern problems of theory of machines*, 2016, no. 4, pp. 177–183.
23. Gots A.N. *Raschet'y na prochnost' pri peremennykh napryazheniyakh* [Strength calculations at alternating voltages]. Vladimir, VIGU Publ., 2012. 138 p.
24. Manoj V., Manohar Shenoy K., Gopinath K. Developmental studies on rolling contact fatigue test rig. *Wear*, 2008, vol. 264, no. 7-8, pp. 708–718.
25. Tomaszewski T., Sempruch J. Verification of the fatigue test method applied with the use of mini specimen. *Key Engineering Materials*, 2014, vol. 598, pp. 243–248.
26. Venediktov N.L., Venediktov A.N., Kovensky I.M. Tests coatings under variable loads. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz*, 2017, no. 1, pp. 95–98.

THE PLANT FOR TESTING COATINGS SAMPLES UNDER VARIABLE LOADS

© 2019

A.N. Venediktov, PhD (Engineering)

N.L. Venediktov, PhD (Engineering), Associate Professor
Tyumen Industrial University, Tyumen (Russia)

Keywords: electrolytic coatings; fatigue tests; coating fatigue; coating stresses; variable loads.

Abstract: While in operation, the parts with the applied coatings often work under variable loads, which affects the service life of the products. Many papers deal with the study of fatigue properties of such products, however, the study of the influence of variable loads on the structure and properties of the coatings has a fragmented nature. As the determination of fatigue characteristics of samples with the applied coatings is still important, the goal of this paper is to develop the design of the plant for fatigue tests and the technique of testing the samples with coatings under the variable loads.

To develop the technique of fatigue tests, the authors created a unique design plant. When developing the plant, the authors considered the fact that the loading of a sample should be regular that the base and the substrate materials will experience stresses constant along the full length of a sample.

Using the analytical solution of the strength task, the authors developed the technique of determining the stresses in a coating and a substrate. To prove the appropriateness of using the suggested technique, the numerical methods were used. For this purpose, using the *Comsol Multiphysics* software in a 2-D setup, the authors were solving the task of determining stresses in a sample consisted of two layers of the materials.

In the result of the study, the authors developed the design of an experimental plant for testing samples with coatings with the maximum tensile force of 5000 N and the possibility of smooth change of vibrational frequency.

The authors developed and tested the technique of testing samples with coatings without separation of a coating from a substrate. The study showed that the application of the described technique is reasonable if the thickness of a coating is not more than 7 % of the thickness of a substrate.