

## Проблема качества износостойких покрытий

# 02, февраль 2014

DOI: 10.7463/0214.0697616

Абашин М.И., Галиновский А.Л., Елисеев А.Н., Павлов А.М., Моисеев В.А.

УДК 620.1

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

[abashin@bmstu.ru](mailto:abashin@bmstu.ru)

[galcomputer@mail.ru](mailto:galcomputer@mail.ru)

[a.n.eliseev@gmail.com](mailto:a.n.eliseev@gmail.com)

[pavlov\\_arseniy@mail.ru](mailto:pavlov_arseniy@mail.ru)

[v.a.moiseev@mail.ru](mailto:v.a.moiseev@mail.ru)

### Введение

В настоящее время существует многообразие методов диагностики покрытий [1-10], все они обладают рядом недостатков и, прежде всего, связанных с невозможностью оценить устойчивость покрытия к действию внешних знакопеременных нагрузок, имеющих волновой нестационарный характер.

Учитывая имеющийся опыт по оценке физико-механических характеристик поверхностного слоя материалов и изделий с использованием информации о параметрах его гидроэрозии в результате воздействия высокоскоростной струи жидкости [11, 12] возникло гипотетическое предположение о возможности использования данной научно-практической идеи для изучения параметров покрытий, прежде всего имеющих малую толщину [13]. Кроме того, технология ультразвуковой диагностики (УСД), показала свою состоятельность и при оценке динамической прочности конструкционной композиционной керамики [14]. Таким образом, области реализации УСД постоянно расширяются и находят новые грани реализации в машиностроительном производстве в особенности на этапах технологической подготовки производства.

Поскольку методологическая база УСД хотя и имеет ряд близких и общих элементов, сам алгоритм ее применения и инженерная методика должны быть существенно адаптированы, дополнены, а в некоторых случаях и кардинально пересмотрены в зависимости от решаемой технологической задачи. Таким образом, цель исследования состоит в разработке методик УСД износостойких покрытий, а задачами являются построение алгоритма диагностики, определение числа информативных параметров, выбор технологических режимов воздействия, разработка

упрощенных математических моделей, выдача практических рекомендаций по использованию предложенной методики.

### Диагностика износостойких покрытий

В соответствии с поставленной целью и сформулированными задачами был разработан методический план проведения исследований, состоящий из шести ключевых этапов: нанесение покрытия на специально изготовленные образцы, проведение усталостных испытаний, УСД покрытий, измерение глубины гидрокаверн с помощью профилометра-профилографа, морфологического анализ поверхностного слоя образцов, проведение сопоставительных испытаний по скрайбированию поверхности образцов с помощью высокотвердого индентора.

В данной работе для проведения экспериментов использовалось тонкое износостойкое покрытие на основе нитрида титана (TiN), нанесенное на подложку из стали 08X18H10 методом ионно-плазменного осаждения (табл. 1).

Таблица 1

#### Характеристика экспериментального покрытия

Основа	Микротвердость до, ГПа	Толщина, мкм	Кэф. трения	Макс. Рабочая температура, °С	Цвет
TiN	24	4	0.55	600	золотой

Следует сказать, что данное покрытие было нанесено на образцы, изготовленные по соответствующему стандарту (ГОСТ 25.502) для проведения усталостных испытаний на специально разработанной для этих целей установке.

На следующих этапах исследования была проведена серия усталостных испытаний образцов и осуществлено моделирование данного процесса методом конечных элементов.

Усталостные испытания проводились по следующему алгоритму: первый образец испытывался до образования макротрещины на образце (или его разрушения) число циклов нагружения  $N$  фиксировалось счетчиком импульсов. Затем число циклов для каждого последующего образца уменьшалось на 25%, таким образом, были получены образцы, прошедшие известное число циклов нагружения. Чертеж образца и схема нагружения представлены на рис. 1 и 2.

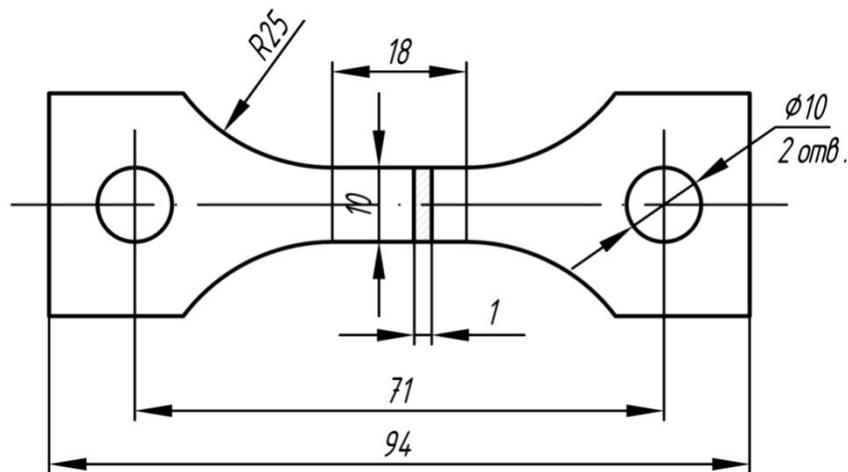


Рис. 1. Образец для испытаний

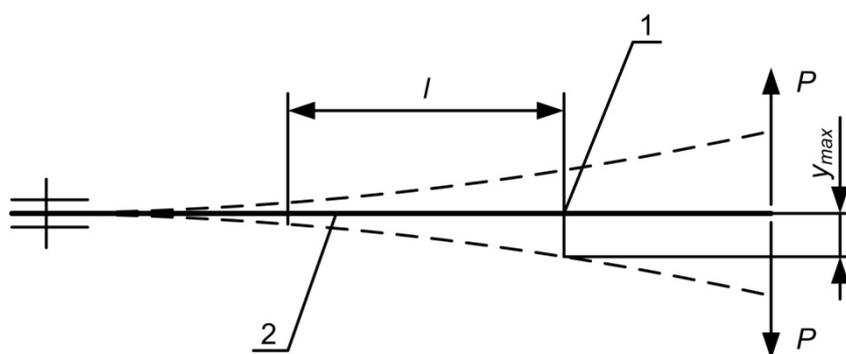


Рис. 2. Принципиальная схема нагружения образца

При разработке математической модели в ее основу была положена объёмная модель стандартного образца для испытаний (рис. 1). На модель были наложены граничные условия в соответствии с рис. 1 имитирующие те, которые использовались при проведении усталостных испытаний. Один конец пластинки был закреплён неподвижно, на расстоянии 38 мм от другого конца было задано перемещение 3,4 мм в виде симметричного цикла нагружения в соответствии с рис. 2.

Ресурс оценивался на основе картины напряжённо-деформированного состояния в статическом положении, а заключение о ресурсе было сделано на основании известной диаграммы Веллера для стали [15]. Диаграмма ставит в соответствие напряжениям, возникающим в образце, количество циклов нагружения, которое должен выдержать материал при данном значении эквивалентного напряжения, в данном случае – сталь 08X18H10.

Согласно проведённому расчёту, максимальные напряжения для данных граничных условий составляют в образце 610 МПа, т.е. превышают напряжения текучести для стали 250 МПа и предел

прочности 450 МПа с коэффициентом запаса по текучести 0,4. Напряжённно-деформированное состояние модели образца показано на рис. 3, прямой линией обозначена область, где эквивалентные напряжения превышают предел текучести образцов.

Из рис. 3 видно, что зона максимальных напряжений соответствует месту излома образца, доведенного до разрушения при усталостных испытаниях. В результате получения полей напряжений были определены координаты расположения реперных аналитических точек 1, 2 и 3, где первая точка – точка максимальных напряжений, вторая точка – точка средних значений и третья точка - область практически не подверженная усталостной нагрузке.

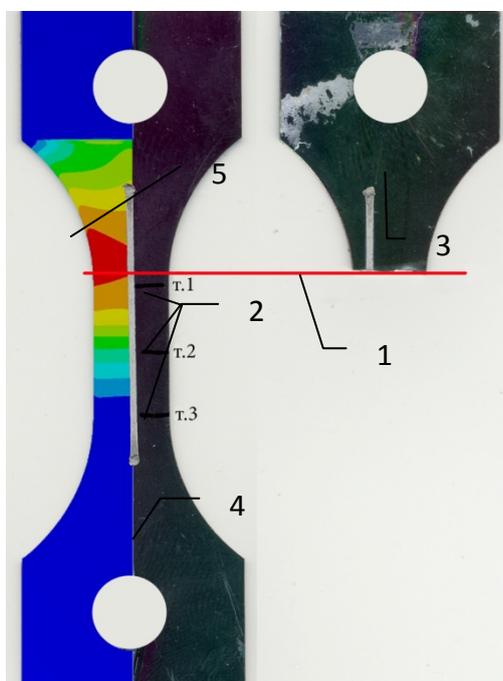


Рис. 3. Напряжённно-деформированное состояние образца при усталостных испытаниях:

1 – область, где эквивалентные напряжения превышают предел текучести образцов; 2 – реперные точки на гидрокаверне; 3 – образец доведенный до разрушения; 4 – образец подвернутый моделированию; 5 – гидрокаверна.

На рис. 4 показан участок усталостного разрушения и участок хрупкого разрушения (полоса более тёмного цвета). Ширина участка долома составляет примерно 1/3 толщины образца, аналогичную ширину можно наблюдать на картине результатов конечно-элементного моделирования. Можно предположить, что отклонение от центра сечения вызвано определённой

неравномерностью расположения дислокаций в микроструктуре материала, ввиду относительного смещения которых возникают пластические деформации, что не учитывает конечно-элементная модель.

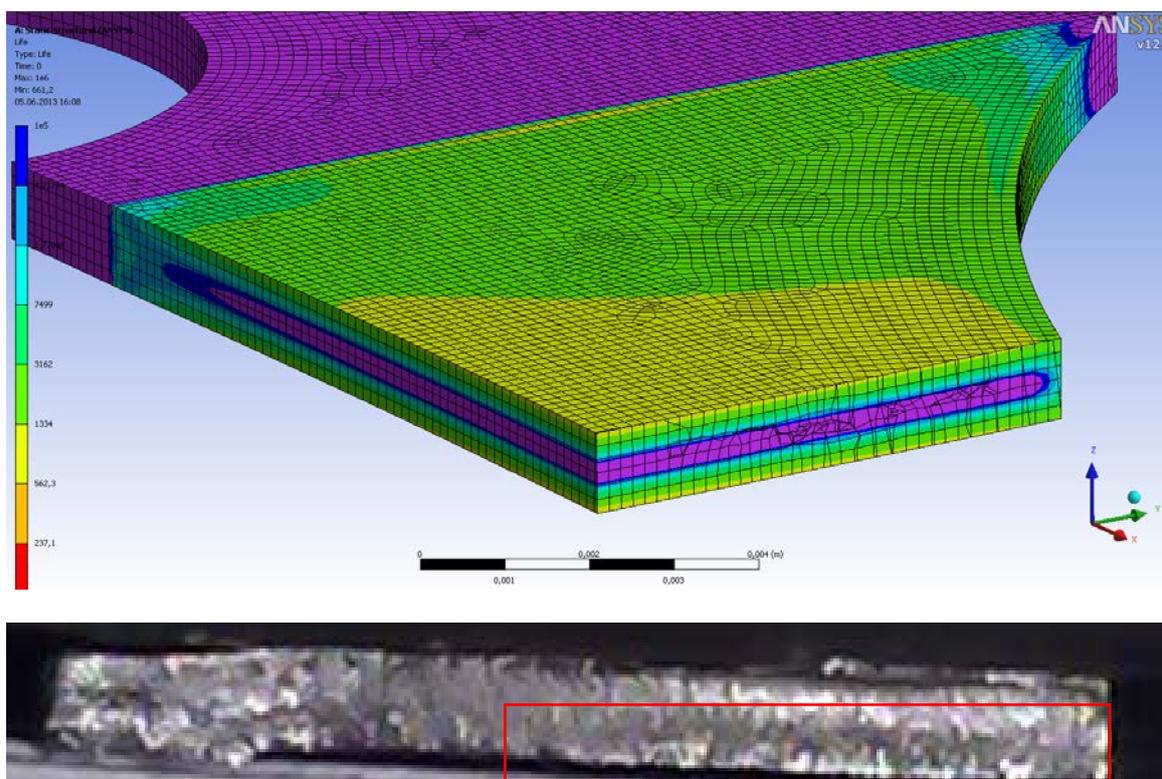
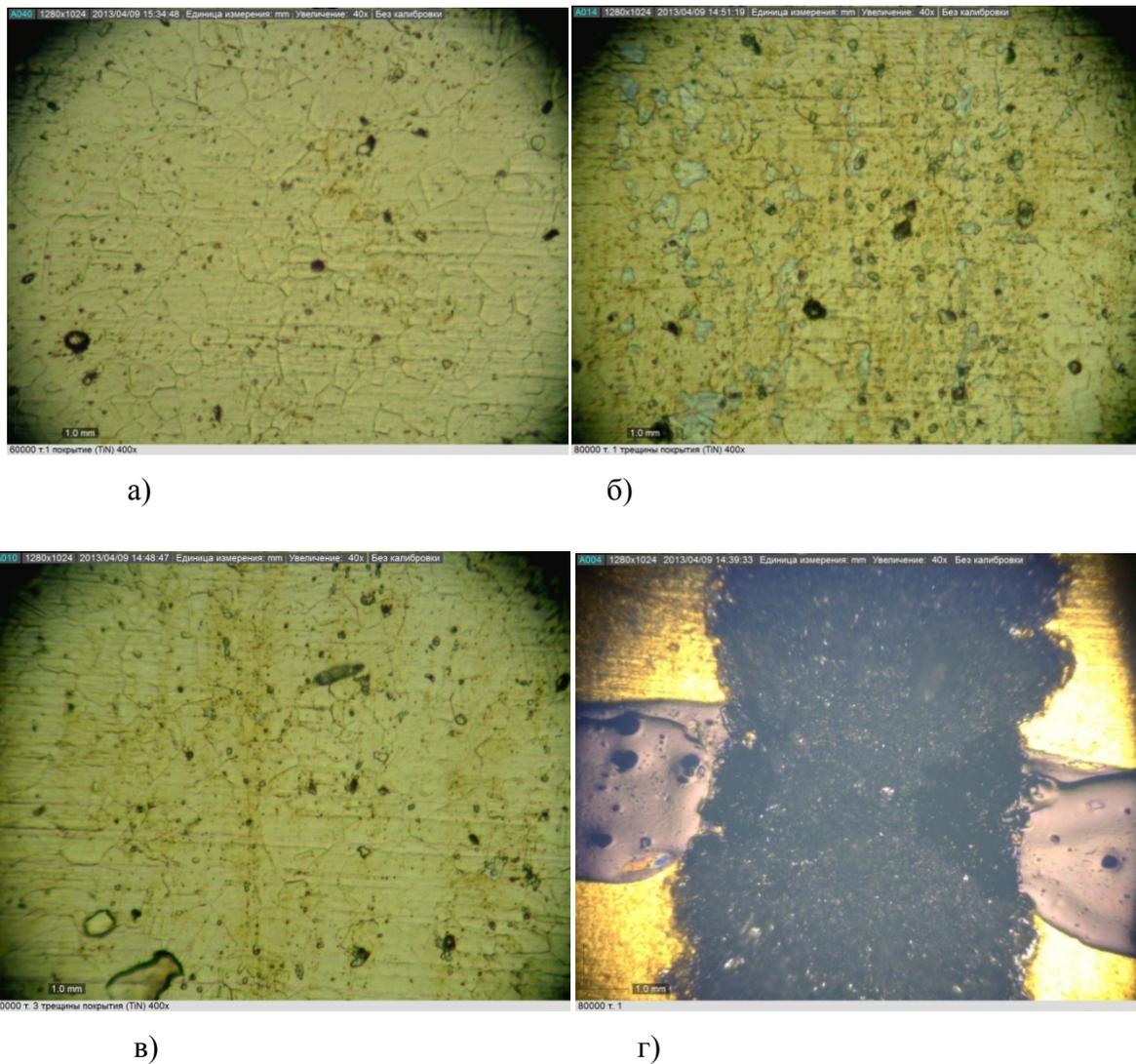


Рис. 4. Зона усталостного разрушения (конечно-элементная модель и экспериментальный образец)

### Результаты экспериментальных исследований

Все образцы, прошедшие усталостные испытания, были подвержены процедуре УСД по известной методике [12, 13]. При изучении гидрокаверн по длине образца в реперных точках 1, 2 и 3 (см. рис. 3) расположенных на одинаковом удалении друг от друга с заданным интервалом было установлено, что растрескивание и отслоение нанесенного покрытия от подложки было наиболее характерно выражено в месте сосредоточения наибольших напряжений (реперная точка 1, см. рис. 3).

Очевидным из литературных источников является тот факт, что с ростом числа циклов усталостного нагружения происходит накопление поврежденности в материале покрытия и самого образца тем больше, чем ближе соответствующая реперная точка расположена к зоне с наибольшими напряжениями [15]. На рис.5 представлены изображения поверхности образца с покрытием TiN при увеличении 400 крат и вид гидрокаверны при увеличении 40 крат.



а)

б)

в)

г)

Рис. 5. Изображение поверхности образцов с покрытием TiN:  
 а- 60 000 циклов, точка 1; б- 80 000 циклов, точка 1; в - 80 000 циклов точка 3; г –  
 изображение гидрокаверны в точке 1 при 80 000 циклов

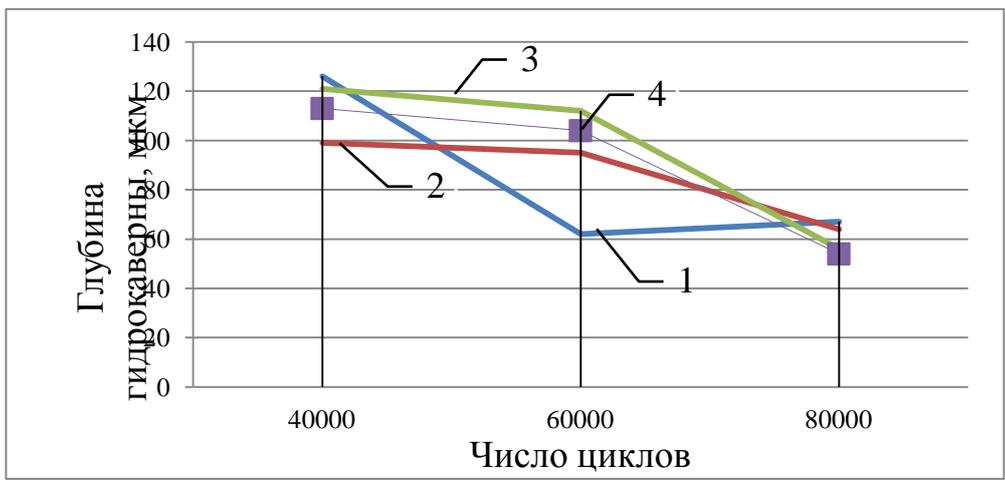


Рис. 6. Зависимости глубины гидрокаверн от числа циклов нагружения для образцов с покрытием TiN: 1 – 3 реперные точки; 4 – значения для образца без покрытия в реперной точке 1

Самостоятельный интерес представляет сравнение данных морфологии поверхности покрытий с результатами измерения глубины гидрокаверн. Из рис. 6 видно, что с увеличением числа циклов с 40000 до 60000 уменьшается глубина гидрокаверны в связи с выработкой пластичности материала и повышением твердости. При этом с приближением к реперной точке 1 (точке максимальных напряжений) глубина уменьшается интенсивнее (см. рис. 6). Характер этих изменений соответствует зависимости глубины гидрокаверны от числа циклов нагружения для образцов без покрытия. Однако для 80000 циклов в той же зоне наблюдается увеличение глубины. Это связано с ухудшением адгезии частиц покрытия, их растрескиванием, образованием более мелких фрагментов (см. рис. 5). При взаимодействии с высокоскоростной струей жидкости (~800 м/с) частицы покрытия выступают в роли своеобразного абразивного материала, лежащего на поверхности образца. По сути это приводит к эффекту воздействия на поверхность высокотвердых инденторов, внедряющихся в основной материал и увеличивающих глубину гидрокаверны.

### **Выводы**

Одной из проблем применения деталей с износостойкими покрытиями является определение ресурса их работы и выдачи рекомендаций по своевременному моменту вывода из эксплуатации с целью замены или ремонтно-восстановительных работ. Зачастую исследование поверхности покрытия не говорит о его реальном состоянии, поскольку в подповерхностных слоях может быть сосредоточено заметное число микротрещин, размеры которых приближаются или равны критическим значениям. Причем данная ситуация может возникать на фоне достаточно хорошего качества покрытия, например ввиду не выхода трещин на поверхность из-за наличия сжимающих напряжений в поверхностном слое. С другой стороны, например из-за высокой разницы в физико-механических свойствах материала основания и покрытия, может быть отмечена недостаточная адгезия между ними. Все это требует разработки высокоинформативных, достоверных методов оценки качества износостойких покрытий и методов испытаний. Именно созданию инновационного направления диагностики износостойких покрытий с помощью УСД посвящена данная работа. Проведенная совокупность теоретических и экспериментальных исследований позволила сделать вывод, что предложенный метод и сама методика диагностики позволяют установить момент начала разрушения покрытия. Это крайне важно, учитывая тот факт, что в противном случае разрушенные частицы покрытия заметно увеличат износ рабочих поверхностей узлов машин и агрегатов. Другими словами полученные результаты позволяют утверждать, что метод УСД в отличие от традиционных методов диагностики покрытий позволяет оценить время до проведения плановых восстановительных работ.

В ближайшее время доработка методики УСД износостойких покрытий будет дорабатываться, а направления дальнейших исследований буду базироваться на изучении вопросов

влияния физико-механических свойств подложки, вариации технологии нанесения покрытий, моделировании взаимодействия ультразвуков и образцами износостойкие покрытия и др. В ближайшей перспективе будут разработаны практические рекомендации по реализации алгоритма диагностики в производственных условиях.

### Список литературы

1. Левашов Е.А., Петржик М.И., Тюрина (Бычкова) М.Я., Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Цыганков П.А., Рогачев А.С. Многослойные наноструктурные тепловыделяющие покрытия. Получение и аттестация их механических и трибологических свойств // *Металлург*. 2010. № 9. С. 66-74.
2. Левашов Е.А., Штанский Д.В., Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Петржик М.И., Тюрина (Бычкова) М.Я., Шеveyко А.Н. Многофункциональные наноструктурные покрытия: получение, структура и обеспечение единства измерений механических и трибологических свойств // *Деформация и разрушение материалов*. 2009. № 11. С. 19-36.
3. Григорьев С.Н., Фоминский В.Ю., Романов Р.И., Калустян Г.Г., Бычкова М.Я.. Влияние режимов импульсного лазерного осаждения на трибомеханические свойства тонкопленочных покрытий Mo-Se-Ni-C // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2011. № 9. С. 23-31.
4. Levashov E.A., Shtanskiy D.V., Kiryukhantsev-Korneev F.V., Petrzhik M.I., Tyurina M.Ya., Sheveyko A.N. Multifunctional nanostructured coatings: Formation, structure, and the uniformity of measuring their mechanical and tribological properties // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2010. Vol. 2010, no. 10. P. 917-935. DOI: 10.1134/S0036029510100113
5. Levashov E.A., Petrzhik M.I., Tyurina M.Ya., Kiryukhantsev-Korneev F.V., Tsygankov P.A., Rogachev A.S. Multilayer nanostructured heat-generating coatings. Preparation and certification of mechanical and tribological properties // *Metallurgist*. 2011. Vol. 54, no. 9-10. P. 623-634. DOI: 10.1007/s11015-011-9350-5
6. Душик В.В., Лахоткин Ю.В., Ануфриев Н.Г., Кузьмин В.П., Рожанский Н.В.. Коррозионное поведение твердых покрытий на основе карбидов вольфрама в кислых растворах // *Коррозия: материалы, защита*. 2012. № 1. С. 31-35.
7. Гаврилов Н.В., Иванов В.В., Мамаев А.С., Емлин Д.Р., Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф., Кузнецов М.В., Липилин А.С., Медведев А.И., Ремпель А.А. Структура и свойства защитных Mn-Co-O покрытий на ферритной хромистой стали, нанесенных магнетронным распылением композитных мишеней // *Физика и химия обработки материалов*. 2007. № 5. С. 23-31.
8. Панин В.Е., Сергеев В.П., Панин А.В. Наноструктурирование поверхностных слоев конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий. 2-е изд. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. 254 с.
9. Блинков И.В., Волхонский А.О., Аникин В.Н., Петржик М.И., Деревцова Д.Е. Фазовый состав и свойства износостойких Ti-Al-Cr-Zr-Nb-N покрытий, производимых методом физического

осаждения в электрической дуге // Неорганические Материалы: Прикладные Исследования. 2011. Т. 2, № 3. С. 285-291.

10. Дианов А.А., Татаркин Е.Ю., Терентьев В.А. Моделирование волнообразования на детали при плоском шлифовании кругами с прерывистой периферией // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. 2010. № 1. С. 33-34.

11. Абашин М.И., Галиновский А.Л., Сгибнев А.В. Технологическое обеспечение процедуры ускоренного определения параметров качества поверхностного слоя материала изделий ракетно-космической техники // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 3. С. 73-79.

12. Абашин М.И., Барзов А.А., Галиновский А.Л., Шутеев В.А. Ультраструйная экспресс-диагностика материалов и изделий машиностроения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 123. С.141-147.

13. Барзов А.А., Галиновский А.Л. Технологии ультразвуковой обработки и диагностики материалов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 246 с.

14. Судник Л.В., Галиновский А.Л., Колпаков В.И., Хафизов М.В., Муляр С.Г., Сайфутдинов Р.Р. Формирование и ультразвуковая диагностика спеченного материала из наноразмерного порошка бемита // Наноинженерия. 2013. № 1. С. 26-31.

15. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. С. 479-483.

**The problem of wear-resistant coatings quality**

# 02, February 2014

DOI: 10.7463/0214.0697616

Mi.I. Abashin, A.L. Galinovsky, A.N. Eliseev, A.M. Pavlov, V.A. Moiseev

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

[abashin@bmstu.ru](mailto:abashin@bmstu.ru)[galcomputer@mail.ru](mailto:galcomputer@mail.ru)[a.n.eliseev@gmail.com](mailto:a.n.eliseev@gmail.com)[pavlov\\_arseniy@mail.ru](mailto:pavlov_arseniy@mail.ru)[v.a.moiseev@mail.ru](mailto:v.a.moiseev@mail.ru)

The article aims at solving a problem concerning the express evaluation of the wear-resistant nanostructure coatings quality using the method of ultra-fluid jet examination. Conducted research activities have shown that an intensity of the coating delamination from the substrate depends on the stress concentration level in the test sample. The proposed informatively methodological procedure of ultra-fluid jet examination will allow prompt estimation of physical-and-mechanical parameters and operational condition of coatings being deposited on samples and passed fatigue loading. The offered procedure can be effectively used for selecting the coating material, substrate, and efficient modes of application.

---

**Publications with keywords:** [test](#), [coating analysis](#), [delamination](#)**Publications with words:** [test](#), [coating analysis](#), [delamination](#)

---

**References**

1. Levashov E.A., Petrzhik M.I., Tyurina (Bychkova) M.Ya., Kiryukhantsev-Korneev F.V., Tsygankov P.A., Rogachev A.S. [Multifunctional nanostructured coatings: Formation, structure, and the uniformity of measuring their mechanical and tribological properties]. *Metallurg*, 2010, no. 9, pp. 66-74. (in Russian)
2. Levashov E.A., Shtanskiy D.V., Kiryukhantsev-Korneev F.V., Petrzhik M.I., Tyurina (Bychkova) M.Ya., Sheveyko A.N. [Multifunctional nanostructured coatings: Formation, structure, and the uniformity of measuring their mechanical and tribological properties]. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2009, no. 11, pp. 19-36. (in Russian)
3. Grigor'ev S.N., Fominskiy V.Yu., Romanov R.I., Kalustyan G.G., Bychkova M.Ya. [Effect of pulsed laser deposition conditions on the tribological and mechanical properties of thin film Mo-Se-Ni-C coatings]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2011, no. 9, pp. 23-31. (in Russian)

4. Levashov E.A., Shtanskiy D.V., Kiryukhantsev-Korneev F.V., Petrzhik M.I., Tyurina M.Ya., Sheveyko A.N. Multifunctional nanostructured coatings: Formation, structure, and the uniformity of measuring their mechanical and tribological properties. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2010, vol. 2010, no. 10, pp. 917-935. DOI: 10.1134/S0036029510100113
5. Levashov E.A., Petrzhik M.I., Tyurina M.Ya., Kiryukhantsev-Korneev F.V., Tsygankov P.A., Rogachev A.S. Multilayer nanostructured heat-generating coatings. Preparation and certification of mechanical and tribological properties. *Metallurgist*, 2011, vol. 54, no. 9-10, pp. 623-634. DOI: 10.1007/s11015-011-9350-5
6. Dushik V.V., Lakhotkin Yu.V., Anufriev N.G., Kuz'min V.P., Rozhanskiy N.V. [Corrosion behavior of hard coatings based on tungsten carbides in acidic solutions]. *Korroziya: materialy, zashchita - Corrosion: Materials, Protection*, 2012, no. 1, pp. 31-35. (in Russian)
7. Gavrilov N.V., Ivanov V.V., Mamaev A.S., Emlin D.R., Koval' N.N., Ivanov Yu.F., Kuznetsov M.V., Lipilin A.S., Medvedev A.I., Rempel' A.A. [Structure and properties of protective Mn-Co-O coating on ferritic chromium steel, deposited by magnetron sputtering of composite targets]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2007, no. 5, pp. 23-31. (in Russian)
8. Panin V.E., Sergeev V.P., Panin A.V. *Nanostrukturirovanie poverkhnostnykh sloev konstruksionnykh materialov i nanesenie nanostrukturnykh pokrytiy* [Nanostructuring of the surface layers of structural materials and application of nanostructured coatings]. Tomsk, TPU Publ., 2010, 254 p. (in Russian)
9. Blinkov I.V., Volkhonskiy A.O., Anikin V.N., Petrzhik M.I., Derevtsova D.E. [Phase Composition and Properties of Wear Resistant Ti-Al-Cr-Zr-Nb-N Coatings Manufactured by the Arc -Physical Deposition Method]. *Neorganicheskie Materialy: Prikladnye Issledovaniya*, 2011, vol. 2, no. 3, pp. 285-291. (in Russian)
10. Dianov A.A., Tatarkin E.Yu., Terent'ev V.A. [Wave formation modeling on the work piece while flat grinding with discontinuous side wheels]. *Obrabotka metallov: tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty*, 2010, no. 1, pp. 33-34. (in Russian)
11. Abashin M.I., Galinovskiy A.L., Sgibnev A.V. [Technological Support Procedures for Express Determination of Quality Parameters of Superficial Layer Material of the Space-Rocket Products]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie - Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2013, no. 3, pp. 73-79. (in Russian)
12. Abashin M.I., Barzov A.A., Galinovskiy A.L., Shuteev V.A. Ul'trastruynaya ekspress-diyagnostika materialov i izdeliy mashinostroeniya [Ultra-fluid jet express diagnostics of materials and engineering products]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*, 2011, no. 123, pp.141-147. (in Russian)
13. Barzov A.A., Galinovskiy A.L. *Tekhnologii ul'trastruynoy obrabotki i diyagnostiki materialov* [Technology of ultra-fluid jet processing and diagnostics of materials]. Bauman MSTU Publ., 2009. 246 p. (in Russian)

14. Sudnik L.V., Galinovskiy A.L., Kolpakov V.I., Khafizov M.V., Mulyar S.G., Sayfutdinov R.R. [Formation and ultra-fluid jet diagnostics of sintered material of nanosized powder boehmite]. *Nanoinzheneriya*, 2013, no. 1, pp. 26-31. (in Russian)
15. Feodos'ev V.I. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1999, pp. 479-483. (in Russian)