

UDK 621.793.7: 620.178.53: 539.4:539.67

## ОБ ОСНОВНЫХ КОНЦЕПЦИЯХ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

*А.В. ДУДАН*

*Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь*

*В.И. КАЛИНИЧЕНКО*

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический университет им. Игоря Сикорского», Киев, Украина*

*А.В. ЛОПАТА, И.В. СМИРНОВ, В.Я. НИКОЛАЙЧУК*

*Винницкий национальный аграрный университет, Винница, Украина*

*В работе рассмотрены основные концепции решения проблемы упрочняющих покрытий и предложен двухсторонний подход к изучению композиции основа - покрытие и прогнозированию ее свойств, т. е. установлению зависимости механических свойств композиции от конструктивно-технологических факторов ее создания путем построения физических моделей разрушения, отражающих физическую суть изучаемых явлений. Показано, что нанесение покрытий вносит целый ряд сложностей, что связано с наличием адгезионного контакта на границе раздела разнородных материалов и неаддитивности ее свойств в зависимости от свойств отдельных составляющих композиции основа – покрытие.*

Нанесение покрытий на упрочняемую и защищаемую поверхность вносит целый ряд сложностей и неопределенностей при проектировании деталей с покрытиями и прогнозировании их свойств. Это связано с особенностями композиции основа — покрытие, прежде всего с наличием адгезионного контакта на границе раздела разнородных материалов и неаддитивности ее свойств в зависимости от свойств отдельных составляющих композиции. Отличительная особенность композиции — различие теплофизических и механических свойств материала основы и отдельных слоев покрытия. Это - причина того, что в таких композициях при любых схемах термического или механического нагружения имеются остаточные напряжения, которые неравномерно распределены по объему материала.

Первой важной особенностью композиции основа - покрытие является неоднородность напряженно-деформированного состояния (НДС) композиции, которая может сглаживаться или усугубляться в процессе длительного высокотемпературного нагружения, что связано с развитием

диффузионных процессов. Интенсивность этих процессов определяется различием химического состава покрытия и основы. Эти процессы могут стать причиной разрушения или отслоения покрытия.

Второй важной особенностью композиции основа - покрытие является проявление при определенных условиях физических эффектов, связанных с созданием энергетических барьеров на пути движения дислокаций в основе и выходе их на поверхность. Эти эффекты были описаны Р. Роско еще в начале XX в. и названы его именем. Нанесение тонких твердых пленок с высоким модулем упругости затрудняет выход дислокаций на поверхность основного материала и их перемещение в поверхностных слоях основы, а также блокирует поверхностные источники дислокаций. Это приводит к многократному снижению скорости установившейся ползучести, повышению пределов текучести и прочности.

Третьей особенностью исследуемых композиций является существенная зависимость структуры и свойств покрытия, диффузионных процессов на границе раздела системы основа - покрытие от целого ряда технологических факторов, таких, как температуры подложки на различных этапах нанесения покрытия, параметров механической обработки (МО) поверхности, ее состояние после шлифовки и некоторых других. Наиболее развиты подходы к изучению деформирования и разрушения твердого тела с однослойным покрытием при его нагружении в области упругих деформаций. Анализ НДС позволяет установить связь характера разрушения композиции основа - покрытие с физико-механическими характеристиками покрытия и основы, а также с соотношением их толщин.

Практически все разработанные критерии предельного состояния композиции основа - покрытие не предусматривают учета всех перечисленных выше факторов, определяющих несущую способность и долговечность композиции. Пока не удалось установить количественную связь между характером развития диффузионных процессов на границе раздела основа - покрытие, интенсивностью генерирования и перемещения дислокаций в твердом теле, структурными особенностями покрытия и прочностными параметрами композиции основа - покрытие.

Таким образом, количественный учет всех факторов и параметров диффузионных процессов, физических эффектов типа эффекта Роско, статистического аспекта разрушения, структурных особенностей композиции основа - покрытие и отдельных ее составляющих, закономерностей трещинообразования в покрытии, неоднородности НДС композиции, как при

изотермическом, так и при термоциклическом нагружениях в рамках единого подхода пока невозможен.

Для изучения столь сложных систем и установления количественной связи исследуемых независимых переменных с одной или несколькими зависимыми в последнее время все шире используются методы математического планирования эксперимента. Это позволяет решить задачу выбора оптимальных конструктивно-технологических факторов нанесения покрытий по параметрам прочности с учетом рассчитанных на основе экспериментальных данных математических моделей, устанавливающих связь указанных факторов и прочностных параметров. Этот подход позволяет наметить дальнейший план исследований, уточнив важные факторы, а, что не менее полезно, отсеять те, которые не влияют на эксплуатационные характеристики детали с покрытием.

Ограниченность такого подхода заключается, прежде всего, в сложности прогнозирования свойств композиции основа - покрытие при выходе за пределы области планирования эксперимента. Это становится возможным в случае обобщения установленных количественных соотношений между конструктивно-технологическими факторами нанесения покрытия и прочностными характеристиками рассматриваемой композиции, прежде всего на основе анализа ее НДС. Сопоставление полученных экспериментальных данных позволяет установить принципы снижения или увеличения несущей способности композиции основа — покрытие и внести такие изменения в схему конструкции покрытия, благодаря которым удастся достичь однородного распределения напряжений по сечению детали и снизить растягивающие напряжения в покрытии.

В случае изучения покрытий, материал которых отличается не только физико-механическими характеристиками, но и типом кристаллической решетки, важное значение приобретает исследование процессов трещинообразования и разрушения покрытия и их влияния на закономерности деформирования и разрушения композиции основа - покрытие в целом. Это достигается наблюдением за состоянием поверхности образца с покрытием непосредственно в процессе его испытаний. В последующем важную информацию позволяет получить использование металлографических и фракто - графических методов исследований. Электронная фрактография - один из нелегких, а часто и единственный метод, позволяющий ответить на вопрос о причинах и механизмах потери устойчивости материала покрытия. Количественная стереофрактография дает возможность не только составить более достоверное суждение о процессах разрушения на каче-

ственном уровне, но и получить уникальные количественные данные локальных разрушений.

Таким образом, перспективным представляется двухсторонний подход к изучению композиции основа — покрытие и прогнозированию ее свойств, т. е. установление зависимости механических свойств композиции от конструктивно-технологических факторов ее создания путем построения физических моделей разрушения, отражающих физическую суть изучаемых явлений.

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯМ  
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ОАО «НПО «ЦЕНТР  
НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПАРК  
ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

## **Инновационные технологии в машиностроении**

Электронный сборник материалов международной  
научно-технической конференции,  
посвященной 50-летию машиностроительных специальностей  
и 15-летию научно-технологического парка  
Полоцкого государственного университета  
(Новополоцк, 21-22 апреля 2020 г.)



**ИnnТехМаш**

Под редакцией  
чл.-корр. НАН Беларуси, д-ра техн. наук, проф. В. К. Шелега;  
д-ра техн. наук, проф. Н. Н. Попок

Новополоцк  
Полоцкий государственный университет  
2020

УДК 621(082)

*Редакционная коллегия:*

Н. Н. Попок (председатель), В. П. Иванов (зам. председателя),  
Р. С. Хмельницкий (отв. Секретарь), А.В. Дудан, В. А. Данилов, Е.В. Бритик

***Инновационные технологии в машиностроении*** [Электронный ресурс] : электронный сборник материалов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию научно-технологического парка Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 21-22 апр. 2020 г. / Полоц. гос. ун-т ; под. ред. В. К. Шелега; Н. Н. Попок. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. – 1 опт. диск (CD-ROM).

ISBN 978-985-531-691-7.

Отражены современное состояние и направления развития технологии и оборудования механической и физико-технической обработки; рассмотрены вопросы создания современных материалов, изготовления, восстановления и упрочнения деталей машин, автоматизации производства, эксплуатации и модернизации автомобилей и других машин.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов технических специальностей учреждений образования.

Прилагаются [титulyные листы презентаций докладов](#) участников конференции.

*Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса. Регистрационное свидетельство № 3141815008 от 28.03.2018.*

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь  
тел. 8 (0214) 59-95-53, e-mail: n.popok@psu.by

**№ госрегистрации 3141815008****ISBN 978-985-531-691-7**

© Полоцкий государственный университет, 2020

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения

Для создания текстового электронного издания «Инновационный технологии в машиностроении» использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

Компьютерный дизайн *Е. А. Балабуровой*  
Техническое редактирование и верстка *И. Н. Чапкевич*

---

Подписано к использованию 23.04.2020.  
Объем издания: 10,9 Мб. Тираж 3 диска. Заказ 264.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

211440, ул. Блохина, 29,  
г. Новополоцк,  
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44  
<http://www.psu.by>