

## УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ

В.В. Тихоненко, А.М. Шкилько

*Украинская инженерно-педагогическая академия (Харьков)*

*Украина*

Поступила в редакцию 25.09.2011

В работе проанализированы наиболее распространенные упрочняющие технологии и показана возможность использования разработанных авторами физических методов для диагностики поверхностного состояния материалов и повышения эффективности технологий.

**Ключевые слова:** упрочняющие технологии, микродуговое оксидирование, экзоэлектронная эмиссия, контактная разность потенциалов.

У роботі проаналізовано найбільш поширені зміцнюючі технології та показано можливість використання розроблених авторами фізичних методів для діагностики поверхневого стану матеріалів і підвищення ефективності технологій.

**Ключові слова:** зміцнюючі технології, микродугове оксидування, екзоелектронна емісія, контактна різниця потенціалів.

The most common strengthening technologies have been analyzed. The possibility of using of developed by authors physical methods for diagnostic of surface state materials and for improving technologies are shown.

**Keywords:** strengthening technologies, microarc oxidation, exoelectron emission, contact potential difference.

### ВВЕДЕНИЕ

Проблеме обеспечения надежности, долговечности и стабильности функциональных характеристик приборов, устройств и узлов машин различного назначения уделяется огромное внимание в машиностроении, атомной энергетике, приборостроении, авиационном двигателестроении и др. Поскольку служебные характеристики деталей в основном определяются свойствами их поверхности, то исключительно актуальным является создание новых и совершенствование существующих технологий поверхностного модифицирования конструкционных материалов [1]. Развитие и применение высоких технологий для модификации поверхностных слоев позволяет формировать пленки и покрытия, которые обладают уникальным сочетанием свойств, принципиально отличающихся от свойств материалов, обработанных традиционными методами [2]. Важной научно-технической задачей является аттестация поверхностных слоев с использованием современных методов диагностики, приобретающая определяющее значение для разработки новых функциональных материалов и изделий.

В работе кратко проанализированы наиболее распространенные упрочняющие технологии и показана возможность использования разработанных авторами физических методов для диагностики поверхностного состояния материалов и повышения эффективности технологий.

### МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРИИ ПОВЕРХНОСТИ

Инженерия поверхности материалов является новым научным направлением, основной целью которого является разработка методов получения поверхностных слоев и нанесения покрытий с оптимальными свойствами и исследование их структуры и эксплуатационных характеристик. Инженерия поверхности объединяет методы направленного изменения физико-химических свойств поверхностных слоев материалов путем деформирования, модифицирования, нанесения тонких пленок и защитных покрытий различными комбинированными способами (рис. 1).

Методы управления свойствами поверхности условно можно разделить на следующие основные группы [3]:

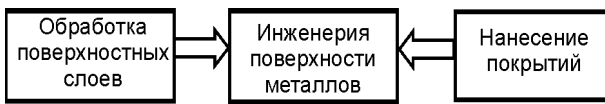


Рис. 1. Направления инженерии поверхности [3].

1. Нанесение покрытий. На поверхности изделия формируется дополнительный слой материала, по своему составу в большинстве случаев отличающийся от основного материала детали. Габаритные размеры детали при этом увеличиваются на толщину слоя покрытия, что дает возможность использовать методы нанесения покрытий не только при изготовлении новых, но и при восстановлении изношенных деталей и конструкций.
2. Легирование поверхности. Улучшение свойств приповерхностного слоя происходит вследствие изменения его химического состава и структурного состояния (аморфизация, создание метастабильного состояния и др.) с сохранением размеров изделий.
3. Модификация структуры поверхностного слоя. При нанесении покрытий обеспечивается новое качество детали (повышается долговечность, улучшаются тепло- и электрофизические свойства, приобретает привлекательный внешний вид и т.д.). При этом практически не существует ограничений на сочетание материалов в системе основа-покрытие.

## МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

Успехи в развитии фундаментальных наук привели к созданию нового вида технологий обработки поверхностных слоев, а именно – упрочняющих технологий, основной задачей которых является получение поверхностных слоев с достаточной прочностью, износо- и коррозионной стойкостью и другими высокими эксплуатационными характеристиками. В настоящее время эта область знаний располагает широким арсеналом методов и средств, позволяющих обеспечить высокие эксплуатационные показатели машин и механизмов.

В последние годы интенсивно развиваются и находят применение новые перспектив-

ные процессы упрочнения, основанные на использовании источников с высокой концентрацией энергии [4 – 5]. К ним относятся электроннолучевая, лазерная и плазменная обработки, ионная технология, электроимпульсное легирование и др. Упрочненные поверхностные слои создают необходимый барьер, защищающий основной металл от воздействия механических нагрузок и рабочей среды. Однако, нанесение покрытий этими способами не всегда удовлетворяет требованиям, которые предъявляются к материалам триботехнического назначения. Зачастую недостаточной оказывается их адгезия с основой или невысокие прочностные характеристики самого покрытия. Дорогостоящее и сложное оборудование, дефицитность используемых материалов ограничивают область их применения в производстве.

В табл. 1 приведен анализ некоторых эффективных методов упрочнения поверхностей деталей машин.

На основании анализа методов упрочнения поверхностей деталей машин установлено, что одним из наиболее перспективных способов поверхностного упрочнения деталей, позволяющим значительно повысить прочностные и защитные свойства деталей из вентильных металлов, является микродуговое оксидирование. Разрабатываемый и изучаемый авторами в настоящее время этот способ поверхностного упрочнения деталей из алюминиевых сплавов позволяет избавиться от недостатков, присущих многим другим способам. На основе известных литературных данных и исследований авторов проведен анализ эффективности технологии получения на алюминиевых сплавах многофункциональных покрытий методом МДО и проблем внедрения ее на предприятиях, выделен круг требующих решения актуальных вопросов [8].

## МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ

Контроль качества защитных покрытий и оксидных пленок имеет большое практическое значение и определяется качественным выполнением всех стадий технологического процесса нанесения покрытий. Основными

## Анализ методов упрочнения поверхностей деталей машин

Название метода	Сущность	Преимущества	Недостатки
Диффузионная металлзация [6].	Заключается в термодиффузионном насыщении цинком алюминиевого сплава. В результате диффузии происходит увеличение размера детали. Нагрев детали производят до температуры 380 °С.	Качественно новый состав поверхностного слоя деталей, характеризующийся высокими физико-механическими и антифрикционными свойствами.	Невысокая производительность, необходимость энергоемкого термического оборудования для нагрева деталей до заданных температур.
Ионно-плазменный метод [1]	Получение в вакуумной камере газообразного потока напыляемого металла или смеси нескольких металлов, его ионизация, ускорение в электрическом и магнитном полях и конденсация на предварительно подготовленной поверхности детали.	На состав, структуру и свойства наносимых покрытий можно влиять за счет введения в вакуумную камеру реакционноспособных газов, обеспечивающих получение высокотвердых износостойких покрытий.	Сложность и высокая стоимость применяемого оборудования, необходимость привлечения специалистов высокой квалификации, дефицитность ряда композиций, используемых для напыления.
Электролитическое хромирование [6].	Электролитическое осаждение хрома.	Электролитически осажденный хром отличается высокими твердостью (около 12 ГПа), износостойкостью и сцепляемостью с основой, а также низким коэффициентом трения.	Низкая производительность и высокая энергоемкость процесса их получения, агрессивность и токсичность применяемых электролитов.
Поверхностное пластическое деформирование [6].	Под воздействием деформирующего элемента (шара, ролика, дорна) при взаимном относительном перемещении инструмента и детали выступы микронеровностей поверхности детали пластически деформируются, заполняя при этом впадины микропрофиля обрабатываемой поверхности.	Изменяется микроструктура и улучшаются физико-механические свойства поверхностного слоя материала детали. Усталостная прочность детали увеличивается на 30 ÷ 70%, а ее износостойкость – в 1,5 ÷ 2,0 раза.	Не обеспечивают получение необходимых размеров детали при ее упрочнении, поэтому уже на предшествующей операции технологического процесса должна обеспечиваться требуемая точность упрочняемой поверхности.
Микродуговое оксидирование (МДО) [7].	Под действием высокого напряжения, прикладываемого между находящейся в электролите деталью и катодом на поверхности детали возникают мигрирующие точечные микродуговые разряды, под термическим, плазмохимическим и гидродинамическим воздействием которых поверхностный слой детали перерабатывается в керамическое покрытие, прочносцепленное с металлической основой.	Получают многофункциональные керамикоподобные покрытия с широким комплексом свойств: износостойкость, коррозионная стойкость, теплоустойчивость, электроизоляционная стойкость и декоративность.	Формируются преимущественно на вентильных металлах (алюминий, титан, тантал и др.)

дефектами поверхностного слоя являются микротрещины, инородные включения, отклонения от требуемых толщин и их неравномерность по поверхности, низкая адгезия или даже отлипание на отдельных участках, повышенная пористость. Объективная оценка качества покрытий позволяет установить причины возникновения дефектов и тем самым оперативно их устранить.

В последние годы появилось значительное количество работ, посвященных исследованию и диагностике поверхности твердотельных объектов с привлечением метода экзoeлектронной эмиссии (ЭЭ) и его разновидно-

стей: фото- и термостимулированная экзoeмиссия электронов (ФСЭЭ, ТСЭЭ), послеемиссия электронов, фототермостимулированная экзoeмиссия (ФТСЭЭ), экзoeмиссионное видеоизображение [9, 10]. Следует отметить, что четкое разграничение наблюдаемых эффектов в соответствии с принятой терминологией наблюдается не всегда, например, явление ФТСЭЭ наблюдается при сочетании термического и оптического стимулирования. Несмотря на это, такая классификация дает, по крайней мере, полезную основу для различения разнообразных проявлений ЭЭ.

Эмиссионные эффекты, сопровождающие процессы механической обработки, трения, износа, разрушения (включающий в себя как стадию и пластическую деформацию) изучены недостаточно хорошо. Причиной этого является большое разнообразие явлений, связанных с процессами аккумуляции и трансформации механической энергии. Среди них образование избыточных электрических зарядов на стенках трещин, образующихся в материалах, электрические разряды и электромагнитное излучение в широком диапазоне (от радиочастот до видимого света), эмиссия быстрых и медленных электронов, положительных и нейтральных частиц, акустоэмиссия, изменение поверхностного потенциала. Эти явления, возникающие при внешних воздействиях на конструкционные материалы, обладают рядом общих признаков, что свидетельствует об общем механизме их генерирования, которые предложено объединять термином “фрактоэмиссия”.

Достоинство экзоэмиссионных методов состоит в том, что эти методы являются бесконтактными и в основном неразрушающими и могут использоваться для диагностики состояния поверхности различных по физико-химической природе материалов и готовых устройств, без изготовления специальных измерительных приспособлений, нанесения контактов и других технологических операций. Это приводит, с одной стороны, к существенной экономии материалов, а с другой стороны, к получению более достоверных результатов. В зависимости от поставленной задачи измерения могут проводиться в вакууме или газовой среде. Наряду с количественными измерениями ЭЭ в последние годы получили развитие методы экзоэмиссионного визуального контроля. Метод ЭЭ прост в реализации и приборно совместим с такими методами электронно-зондовой диагностики, как дифракция медленных электронов, электронная Оже-спектроскопия, ионизационная спектроскопия и др., что позволяет проводить исследования комплексного характера с учетом преимуществ и компенсацией недостатков каждого из методов.

Схему проведения экзоэмиссионных исследований и неразрушающего контроля

можно упрощенно представить следующим образом. Под внешним воздействием (процесс возбуждения) нарушается физико-химическое состояние поверхности твердого тела и приповерхностных слоев, в результате объект переходит в неравновесное состояние, и в процессе стимулирования наблюдается эмиссия заряженных частиц, в первую очередь, электронов и отрицательных ионов. Процессы, приводящие к эмиссии экзоэлектронов, представлены на рис. 2.

Все эмиссионные эффекты наблюдаются при выполнении двух этапов экспериментальной процедуры:

- возбуждение, происходящее при облучении заряженными частицами, фазовых переходах, адсорбции газов, механических воздействиях и т.д.;
- последующая релаксация объекта, сопровождаемая эмиссией низко- и высокоэнергетических электронов, положительных и отрицательных ионов, фотонов, нейтральных и/или возбужденных атомов, акустической эмиссией.

Среди установленных и исследованных областей практического использования экзоэмиссионной диагностики следует отметить [10 – 11]:

1. Обнаружение и изучение начальных стадии разрушения твердых тел – мельчайших зародышевых трещин.
2. Контроль структуры и свойств тонких поверхностных слоев в процессе подготовки поверхности по величине тока и кинетике экзоэмиссии. К примеру, производя тарировку экзоэмиссионной активности деталей по степени пластического деформирования тонких поверхностных слоев, усилиям или длительности трения, можно по относительному изменению интенсивности экзоэмиссии оценивать, соответственно, степень повреждения рабочих поверхностей или условия трения исследуемых деталей.
3. Экзоэмиссионный метод оценки коррозионной стойкости защитных покрытий базируется на установлении экспериментальной зависимости скорости окисления от времени и последующего определения константы окисления, характеризующей интенсивность образования новой среды на поверхности металлов.

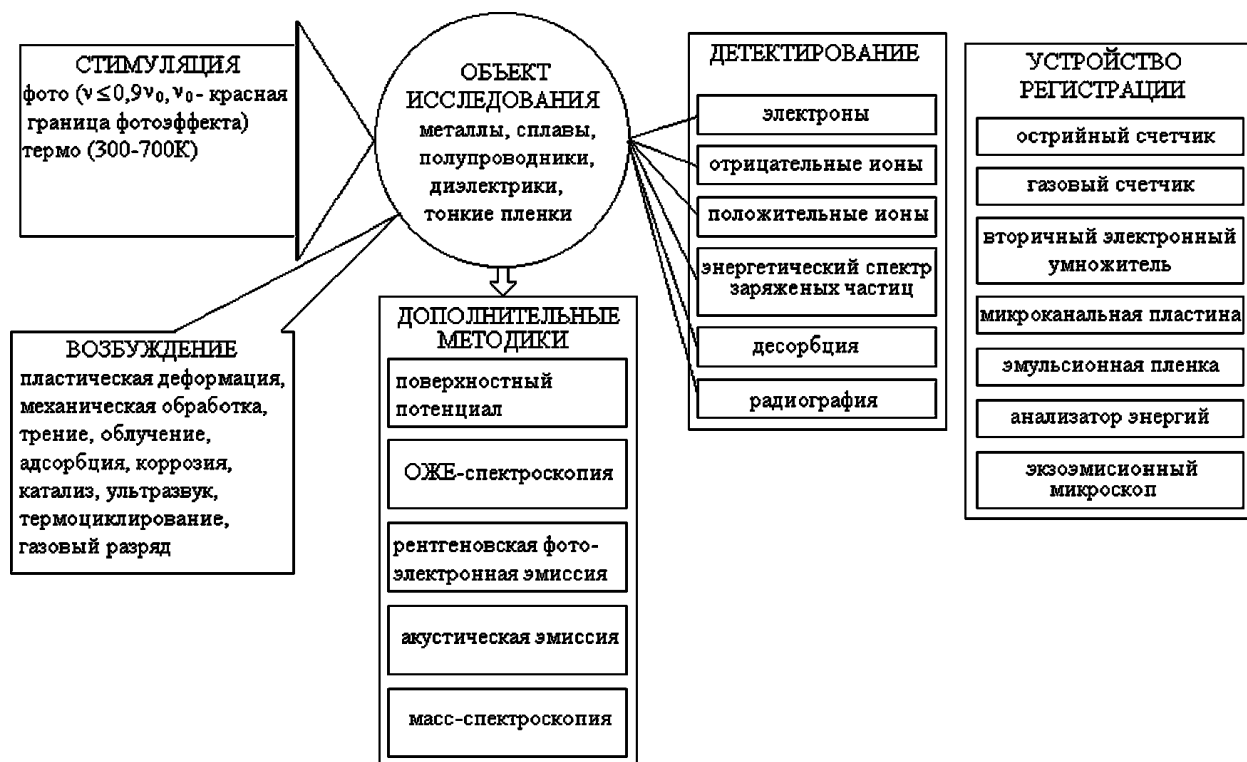


Рис. 2. Процессы, приводящие к эмиссии экзоэлектронов.

4. Корреляция между параметрами ЭЭ, дефектностью и толщиной оксидной пленки (0,01 – 1 мкм), полученной различными способами, независимо от материала подложки.

5. Метод предложен для определения пористости материалов, позволяет определять открытую и общую пористость и в зависимости от диаметра и энергии электронного пучка – распределение пор по поверхности материалов [12].

Методы ТСЭЭ и ФСЭЭ позволяют оценить глубину залегания уровней дефектов в запрещенной зоне полупроводников и диэлектриков (в т.ч. оксидной пленке металлов), параметры взаимодействия электронов с веществом и оценить дефицит кислорода в оксидных материалах, а также идентифицировать окисленные слои металлов, проводить фазовый анализ и т.п.

Достоинством этого подхода, требующего дальнейшего метрологического и инструментального обеспечения, являются высокая чувствительность и пространственная локальность, экспрессность, неразрушающая диагностика объекта.

Эффективным методом неразрушающего экспрессного контроля твердотельных объектов является метод контактной разности по-

тенциалов (КРП). Значение КРП реальной поверхности зависит от наличия на ней адсорбированных и собственных примесей, оксидных пленок и различных загрязнений. Метод КРП позволяет получить информацию о процессах, протекающих на поверхности при и после механохимических, ионных, плазмохимических и других способах обработки [13 – 14].

Установленные зависимости между изменением КРП и режимами подготовки поверхности и качеством поверхностного слоя позволяют решить, и обратную задачу – по величине КРП определить напряжение в отдельных микрообъемах образца, около немагнитических включений и других дефектов, причем независимо от того, вызваны эти нарушения внешними нагрузками или другими факторами, как-то: изменение удельных объемов в результате термообработки, окисления, фазовых и структурных превращений и др.

В последние годы появились сообщения о попытках применения метода КРП непосредственно в производственных условиях, однако, данная проблема еще далека от завершения по следующим причинам. Метод до настоящего времени метрологически не аттестован и не налажен выпуск промышленных приборов для измерения КРП.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Инженерия поверхности является ключевой технологией, обеспечивающей развитие базовых отраслей промышленности. Комплексное использование достижений ряда фундаментальных наук обеспечивает создание и использование в основном и ремонтном производствах новых высокоэффективных ресурсосберегающих технологий и управление функциональными свойствами деталей машин за счет направленного создания поверхностных слоев и их диагностики.

Выполненные исследования показали, что одним из перспективных способов упрочнения деталей из алюминиевых сплавов и восстановления изношенных деталей является микродуговое оксидирование.

Методы экзоэмиссионной диагностики и контактной разности потенциалов являются эффективными методами для диагностики физико-химического состояния поверхности твердотельных объектов и исследования процессов, происходящих в твердых телах, подвергнутых различным внешним воздействиям (деформация, облучение, окисление, разные способы обработки и др.). Методы применимы для различных материалов в широком диапазоне температур и давлений остаточных газов (вакуум, атмосферные условия, газовая среда).

Целью дальнейших исследований является отработка технологии получения МДО-покрытий и применение методов ЭЭ и КРП для диагностики их свойств.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Белоус В.А. Разработки ННЦ ХФТИ в области ионно-плазменных обработок поверхности конструкционных материалов (обзор)//Сб. трудов Харьковской ассамблеи FCG-1: (Харьков: ННЦ ХФТИ). – 2003. – С. 60-73.
2. Азаренков Н.А., Орлов В.Д., Слипченко Н.И., Удовицкий В.Г., Фареник В.И. Нанонауки и нанотехнологии: современные достижения, перспективы, проблемы и задачи развития// Физическая инженерия поверхности. – 2005. – Т. 3, № 1-2. – С. 127-146.
3. Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Д., Корж В.М. Инженерія поверхні: підручник. – К.: Наукова думка, 2007. – 559 с.

4. Рогов В.А., Ушомирская Л.А., Чудаков АД. Основы высоких технологий: учеб. пособие. – М.: Вузовская книга, 2007. – 256 с.
5. Белый А.В., Макушок Е.М., Поболь И.Л. Поверхностная упрочняющая обработка с применением концентрированных потоков энергии. – Минск: “Наука и техника”, 1990. – 179 с.
6. Курчаткин В.В., Тельнов Н.Ф., Ачкасов К.А. и др. Надёжность и ремонт машин/Под ред. В.В. Курчаткина. – М.: Колос, 2000. – 776 с.
7. Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование). – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с.
8. Шкилько А.М., Тихоненко В.В. Анализ способа упрочнения деталей микродуговым оксидированием//Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Зб. наукових праць. Тематичний вісник: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2010. – № 46. – С. 252-257.
9. Кортон В.С., Слесарев А.И., Рогов В.В. Экзоэмиссионный контроль поверхности деталей после обработки. – К.: Наукова думка, 1981. – 171 с.
10. Шкилько А.М. Экзоэмиссионная диагностика поверхности конструкционных материалов. Монография. – Харьков: “Ноулидж”, 2009. – 240 с.
11. Шкилько А.М., Тихоненко В.В., Компанец И.В. Диагностика поверхностных слоев конструкционных материалов//Проблеми тертя та зношування: науково-технічний збірник. – 2008. – Т. 2, Вип. 49. – С. 36-44.
12. Спосіб визначення пористості поверхневих шарів твердих тіл: Патент на корисну модель 51613 Україна, МПК G01N 15/08/В.В. Тихоненко, А.М. Шкілько, І.В. Компанієць (Україна). – № u201000284; Заявл. 14.01.2010; Опублік. 26.07.2010, Бюл. № 14. – 3 с.
13. Шкилько А.М. Неразрушающие методы контроля металлов и узлов энергетического оборудования. – К.: ИСИО, 1994. – 170 с.
14. Шкилько А.М. Метод контактной разности потенциалов//Сб. науч. трудов “Современные приборы, материалы и технологии для технической диагностики и неразрушающего контроля промышленного оборудования”. (Харьков, ХГТУРЭ). – 1998. – С. 248-254.

**LITERATURA**

1. Belous V.A. Razrabotki NNC HFTI v oblasti ionno-plazmennyh obrabotok poverhnosti konstrukcionnyh materialov (obzor)//Sb. trudov

- Har'kovskoj assamblei FCG-1: (Har'kov: NNC HFTI). – 2003. – S. 60-73.
2. Azarenkov N.A., Orlov V.D., Slipchenko N.I., Udovickij V.G., Farenik V.I. Nanonauki i nanotehnologii: sovremennye dostizhenija, perspektivy, problemy i zadachi razvitija//Fizicheskaja inzhenerija poverhnosti. – 2005. – T. 3, № 1-2. – S. 127-146.
  3. Jushhenko K.A., Borisov Ju.S., Kuznecov V.D., Korzh V.M. Inzhenerija poverhni: pidruchnik. – K.: Naukova dumka, 2007. – 559 s.
  4. Rogov V.A., Ushomirskaja L.A., Chudakov A.D. Osnovy vysokih tehnologij: ucheb. posobie. – M.: Vuzovskaja kniga, 2007. – 256 s.
  5. Belyj A.V., Makushok E.M., Pabol' I.L. Poverhnostnaja uprochnjajushhaja obrabotka s primeneniem koncentrirovannyh potokov jenerгии. – Minsk: “Nauka i tehnika”, 1990. – 179 s.
  6. Kurchatkin V.V., Tel'nov N.F., Achkasov K.A. i dr. Nadjozhnost' i remont mashin/Pod red. V.V. Kurchatkina. – M.: Kolos, 2000. – 776 s.
  7. Suminov I.V., Jepel'fel'd A.V., Ljudin V.B., Krit B.L., Borisov A.M. Mikrodugovoe oksidirovanie (teorija, tehnologija, oborudovanie). – M.: JeKOMET, 2005. – 368 s.
  8. Shkil'ko A.M., Tihonenko V.V. Analiz sposoba uprochnenija detalej mikrodugovym oksidirovaniem//Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu “HPI”. Zb. naukovih prac'. Tematičnij visnik: Novi rishennja v suchasnih tehnologijah. – 2010. – № 46. – S. 252-257.
  9. Kortov V.S., Slesarev A.I., Rogov V.V. Jekzozemissionnyj kontrol' poverhnosti detalej posle obrabotki. – K.: Naukova dumka, 1981. – 171 s.
  10. Shkil'ko A.M. Jekzozemissionnaja diagnostika poverhnosti konstrukcionnyh materialov. Monografija. – Har'kov: “Noulidzh”, 2009. – 240 s.
  11. Shkil'ko A.M., Tihonenko V.V., Kompaneec I.V. Diagnostika poverhnostnyh sloev konstrukcionnyh materialov//Problemi tertja ta znošuvannja: naukovo-tehničnij zbirnik. – 2008. – T. 2, Vip. 49. – S. 36-44.
  12. Sposib viznachennja poristosti poverhnevih shariv tverdih til: Patent na korisnu model' 51613 Ukraïna, MPK G01N 15/08/V.V. Tihonenko, A.M. Shkil'ko, I.V. Kompaneec' (Ukraïna). – № u201000284; Zajavl. 14.01.2010; Opublik. 26.07.2010, Bjul. № 14. – 3 s.13. Shkil'ko A.M. Nerazrushajushhie metody kontrolja metallov i uzlov jenergetičeskogo obo-rudovanija. – K.: ISIO, 1994. – 170 s.
  13. Shkil'ko A.M. Metod kontaktnoj raznosti potencialov//Sb. nauch. trudov “Sovremennye pribory, materialy i tehnologii dlja tehničeskoj diagnostiki i nerazrushajushhego kontrolja promyšlennogo oborudovanija”. (Har'kov, HGTURJe). – 1998. – S. 248-254.