

УДК 621.793.620.172

Б.А. Ляшенко, проф., д-р техн.наук

Институт проблем прочности им. Г.С.Писаренко НАН Украины

Л.А. Лопата, доц., канд. техн. наук

Институт воздушного транспорта НАУ

Е.К. Солових, проф., канд. техн. наук, А.Е. Соловых, доц., канд. техн. наук, А.В. Ворона, асп.

Кировоградский национальный технический университет

Повышение долговечности быстроизнашиваемых деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники интегрированными технологиями упрочняющих защитных покрытий

Показано преимущества и недостатки различных сочетаний первичных технологий, а также перспективу их развития. В настоящее время перспективным является поверхностное упрочнение комплексными или комбинированными методами нанесения износостойких покрытий, нанесение покрытий в сочетании с модифицированием, нанесение многослойных, многофункциональных покрытий; развитие интегрированных многооперационных технологий. В условиях всё возрастающего дефицита дорогостоящих легирующих материалов, входящих в состав сталей, требующих высокого комплекса прочностных свойств, перспективными являются интегрированные технологии поверхностного упрочнения малоуглеродистых сталей

поверхностное упрочнение, модифицирование, интегрированные технологии, комплексные или комбинированные методы нанесения износостойких покрытий

Введение. Большинство отказов механизмов машин происходит в результате поверхностного разрушения и, в первую очередь, от изнашивания. Исследования в области трения, изнашивания, износостойкости и принципиально новых типов материалов служат предпосылкой для создания на этой основе новых способов и технологий, направленных на кардинальное решение вопросов увеличения долговечности быстроизнашиваемых деталей.

Нанесение износостойких покрытий на рабочие поверхности деталей машин является одним из путей повышения их работоспособности и защиты контактных поверхностей от интенсивного износа. Перспективным является поверхностное упрочнение комплексными или комбинированными методами нанесения износостойких покрытий и нанесение покрытий в сочетании с модифицированием. По данным Института электросварки им. Е.О.Патона в США и Западной Европе, так называемые «гибридные процессы» упрочнения получают преимущественное финансирование. В настоящее время в практике упрочнения нашли применение следующие «гибридные процессы»:

– сочетание химико-термической обработки с поверхностным пластическим деформированием (азотирование с дробенаклепом, азотирование с холодной накаткой, цементирование с поверхностным пластическим деформированием, в частности наклепом дроби);

© Б.А.Ляшенко, Л.А.Лопата, Е.К. Солових, А.Е. Соловых, А.В. Ворона, 2011

- химико-термическая обработка с последующей электроконтактной обработкой (легирование бором и углеродом с последующей электроконтактной обработкой);
- волочение при воздействии токовых импульсов (электростимулированное волочение);
- газотермическое напыление с последующей холодной прокаткой;
- электромагнитная наплавка с последующей термомеханической обработкой (поверхностным пластическим деформированием);
- пластическое деформирование с диффузионным насыщением (прокатка диффузионным насыщением при газовой цементации) (ППД);
- поверхностное пластическое деформирование с печным нагревом или электронагревом (дробеструйная обработка и электронагрев);
- поверхностное пластическое деформирование с электроимпульсной обработкой (электроимпульсное деформирование при прокатке);
- ППД с микродуговым оксидированием (МДО);
- лазерная закалка с пластическим деформированием;
- плазменное напыление с последующим горячим изостатическим прессованием;
- напыление с наложением вибраций или нагревом;
- упрочнение гальванических покрытий ППД;
- цементация с последующим дробеструйным упрочнением;
- лазерная закалка или легирование с ППД;
- лазерно-ультразвуковое легирование;
- ультразвуковая обработка газотермических покрытий;
- лазерная обработка плазменных покрытий;
- электронно-лучевая обработка электролитических хромовых покрытий;
- электронно-лучевой нагрев детонационных покрытий;
- лазерное упрочнение ионно-азотированного слоя;
- лазерная обработка борированных поверхностей;
- лазерная закалка газового азотирования, лазерная закалка после цементации.

Состояние проблемы. Характерной особенностью технологий поверхностного упрочнения является то, что не удается получить одновременного повышения всех свойств детали для всех режимов эксплуатации. Даже один и тот же материал покрытия, но нанесенный разными способами, показывает различные эксплуатационные свойства.

Широкому внедрению упрочняющих защитных покрытий препятствует их недостаточная прочность и долговечность. Сегодня мнение о недостаточной прочности покрытий в экстремальных условиях эксплуатации общепризнанно как в отечественной, так и в зарубежной литературе [1].

Особые требования предъявляют к покрытиям, которые работают под большими нагрузками в условиях износа. Износ покрытия резко возрастает после определенной нагрузки. Анализ зависимости скорости изнашивания от нагрузки показывает, что при некоторой критической нагрузке у всех материалов существует переход от низкой скорости (слабый износ) к высокой (сильный износ) [2]. Поэтому естественно стремление устранить или уменьшить эти недостатки. В практике упрочняющих покрытий сложилось мнение о положительном эффекте остаточных напряжений сжатия в покрытии, заключающемся в снижении хрупкости. Однако установлено, что высокие остаточные напряжения сжатия на поверхности детали

(например, при цементации) способствуют выкрашиванию цементированного слоя при контактной усталости [3].

Попытки повысить прочность покрытий увеличением прочности адгезионной связи не дают положительного эффекта, даже снижают прочность и пластичность основного материала [4].

Для устранения отмеченных недостатков в настоящее время в разработке материалов для покрытий используют два метода:

1) создание многослойных покрытий вплоть до мультипликации; каждый слой в многослойном покрытии выполняет собственную функцию и обеспечивает плавный переход физико-механических свойств покрытия от поверхности к основе;

2) создание многокомпонентных слоев переменного состава по толщине покрытия.

Оба метода значительно удорожают технологию получения покрытия и снижают надежность получения покрытия высокого качества, так как брак в одном из слоев приводит к снижению качества всего покрытия.

В попытках устранения недостатков покрытий наблюдаются две основные тенденции:

- нанесение многослойных, многофункциональных покрытий;
- развитие интегрированных многооперационных технологий [1].

Каждая технология поверхностного упрочнения имеет свою нишу оптимальных условий использования, включая даже технологические традиции, сложившиеся на конкретном предприятии. В настоящее время еще не сложилась методология синтеза многооперационных технологий. В интегрировании технологий преобладает эмпирически-интуитивный подход. Решающим фактором в выборе первичных технологий и завершающих технологическую цепочку является наличие на предприятии отдельных видов оборудования и возможность интегрировать их в единый технологический цикл.

Отмечают существенное повышение износостойкости использованием модифицируемых материалов в сочетании с методами ионной, электронно-лучевой и лазерной обработки [5, 6]. В условиях всё возрастающего дефицита дорогостоящих легирующих материалов, входящих в состав сталей, требующих высокого комплекса прочностных свойств, перспективными являются интегрированные технологии поверхностного упрочнения малоуглеродистых сталей.

Цель статьи - показать преимущества и недостатки различных сочетаний первичных технологий, а также перспективу их развития.

Результаты исследований и их анализ. Из многообразия вариантов сочетания первичных технологий следует, что наиболее нуждаются в повышении свойств покрытий самые массовые технологии, применяемые в машиностроении, прежде всего – газотермическое напыление. Главные недостатки напыленных покрытий – низкая прочность сцепления и высокая пористость. Улучшают эти свойства лазерной обработкой, электронно-лучевым упрочнением, оплавлением и химико-термической обработкой. Наиболее многочисленны исследования лазерного упрочнения газотермических покрытий [7-23]. Благодаря оптимизации параметров лазерной обработки напыленных электродуговых покрытий получают мелкокристаллическую беспористую структуру с равномерным распределением химических элементов. Этим существенно повышается износостойкость в условиях граничного трения и абразивного изнашивания [7, 12, 23]. Достигают повышения и адгезионной и когезионной прочности покрытия при его наноструктурировании [8, 9]. Лазерная обработка газотермических покрытий повышает их стойкость к высокотемпературной газовой коррозии и коррозии в расплаве $V_2O_5+Na_2SO_4$ [10, 11].

Показаны преимущества и возможности улучшения эксплуатационных характеристик деталей машин, прежде всего триботехнических характеристик. Проанализированы области специализированного использования лазерного улучшения свойств предварительно напыленных покрытий, расширения диапазонов растворения легирующих компонентов, образования необходимых фаз, в том числе метастабильных, уплотнения и аморфизации покрытий небольшой толщины (< 50 мкм) при обеспечении наименьшего термического влияния на основу [16]. Разработана опытно-теоретическая модель, оптимизирующая параметры лазерного излучения по максимуму критерия качества оплавления газотермических покрытий [17]. Показано альтернативное влияние энерговклада на триботехнические характеристики покрытий [18]. С целью снижения энергетических затрат используют способ легирования поверхности совместной обработкой лазерным лучом и плазмой [19].

Лазерное оплавление напыленных покрытий увеличивает микротвердость в 10 раз [20], микротвердость в 2 раза [22], износостойкость в 1,3-1,8 раза [21], износостойкость более чем в 2 раза [23].

Оплавление газотермических покрытий осуществляют токами высокой частоты [14], высокоскоростной импульсно-плазменной струей [24, 25], в вакуумных печах [26-28]. Существенный эффект многократного повышения микротвердости и износостойкости обеспечивает электронно-лучевая обработка напыленных покрытий [24, 29, 30]. Анализ структуры показал, что средний размер зерен в покрытии уменьшается от сотен микрометров до сотен нанометров, а микротвердость увеличивается в 5 раз [30]. Предел выносливости повышается на 60-80%, а прочность сцепления – в 2,5...3,5 раза после электронно-лучевой обработки [29].

Для повышения триботехнических характеристик напыленных покрытий используют ультразвуковую обработку, в том числе одновременно с плазменным напылением [9]. Эффективно применение химико-термической обработки после напыления. После борирования износостойкость напыленных покрытий из стали Св-08 при сухом трении повысилась в 100 раз. Повысилась также адгезионная прочность напыленных покрытий. Ионное азотирование напыленных из сталей 40X13 и X18H10T покрытий обеспечивало микротвердость от 6,5 до 15 ГПа в поверхностном слое от 5 до 40 мкм. При этом износостойкость увеличилась в 8 раз [31].

Одна из наиболее распространенных технологий в машиностроении – электрохимического нанесения покрытий обладает таким существенным недостатком как низкая адгезионная прочность. Повышают триботехнические характеристики композиционных электролитических покрытий лазерной обработкой [32], ультразвуковой обработкой [33], ионным азотированием [34, 35]. При ультразвуковой обработке размер зерен в покрытии зависит от интенсивности обработки, меняясь от 45 НМ до 24 НМ [33]. Ионное азотирование повышает износостойкость при абразивном изнашивании за счет превращения электроосажденного хрома в нитрид Cr_2N [35]. Определен механизм влияния термообработки на упрочнение электроосажденного Fe-V-покрытия, обеспечивающий повышение износостойкости [36]. Технология восстановления изношенных деталей электролитическим железнением с последующей нитроцементацией обеспечивает высокие эксплуатационные характеристики – прочность сцепления, износостойкость, усталостную прочность [37]. Эффективно сульфацианирование электроосажденного Fe-V-покрытия, обеспечивающее повышение износостойкости и снижение коэффициента трения [36].

Находят применение интегрированные технологии в комбинации лазерного легирования и химико-термической обработки [38]. Эта комбинация технологий позволяет получать твердость до 20 ГПа (за счет выделения упрочняющих дисперсных фаз), что приводит к увеличению износостойкости в 1,5-3 раза по сравнению с

азотированными нитрослоями типа сталь 38Х2МЮА [39-43]. Азотированный слой, предварительно легированный Cr и V, имеет твердость 16-18 ГПа. Лазерное легирование алюминием обеспечивает сильно развитую полигонизированную структуру, что ускоряет диффузию азота. При этом твердость достигает 21 ГПа [41, 42].

Работы [44-46] показали, что предварительная дискретная лазерная обработка вносит существенный вклад в процесс последующего газового азотирования. При этом качественный и количественный характер изменений в азотированном слое определяется заранее сформированным структурно-фазовым состоянием. Повышенная растворимость азота в кристаллической решетке стали при обработке ее поверхности лазерным лучом, является следствием образования высокой плотности подвижных дислокаций, а также сильного диспергирования исходной структуры зерен. При этом процесс насыщения поверхности азотом ускоряется в 17 раз на протяжении первого часа. В сравнении с технологиями газового азотирования или дискретно-лазерной обработкой износостойкость при интегрированной технологии повысилась в 2,5 раза [46].

Комбинация лазерной обработки с ионным азотированием существенно увеличивает азотируемость сталей, глубину упроченной зоны и повышает износостойкость [47], обеспечивает повышением твердости в сравнении с ионным азотированием [48].

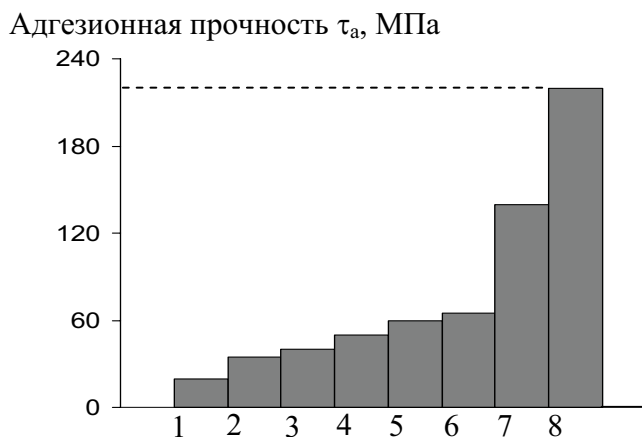
Электроискровое легирование, как и лазерные технологии, относится к способам, использующим высококонцентрированные энергетические источники. Поэтому эффективна также комбинация электроискрового легирования с последующим ионным азотированием [49, 50]. Этим существенно увеличивается глубина слоев повышенной твердости. А вот комбинация лазерной и электроискровой обработки обеспечивает крайне незначительный эффект [51].

Следует отметить явление инверсии, когда изменение последовательности операций упрочнения приводит к отличающимся результатам. Естественно, оптимальный выбор операций и их последовательность определяется повышением твердости комплекса механических свойств, износостойкости, а также шероховатости поверхности и точности размеров детали. Предварительную химико-термическую обработку целесообразно использовать для подготовки поверхности под электроискровое легирование, а финишное электроискровое легирование цементированных и азотированных поверхностей обеспечивает дополнительное повышение твердости и износостойкости [52]. Различная последовательность электроискрового легирования и азотирования позволяет управлять распределением микротвердости в легированном слое, а именно – положением максимума в приповерхностном слое [53]. Отмечают инверсию в комбинации лазерной обработки и ионного азотирования [48]. Лазерная обработка азотированного слоя обеспечивает более плотный оксинитридный слой под поверхностью, а также увеличение глубины азотированного слоя [54]. В наноструктурированном поверхностном слое после шлифования азотированный слой вдвое толще, чем на крупнозернистой поверхности в тех же условиях азотирования, что объясняют ускорением диффузии азота вдоль границ зерен в наноструктурном железе [55, 56]. Финишная дробеструйная обработка азотированного слоя повышает износостойкость и предел выносливости зубчатых передач [57].

Наиболее существенный упрочняющий эффект обеспечивает электроконтактное припекание (ЭКП) газотермических покрытий [58-60]. На рис.1 приведена зависимость адгезионной прочности τ_a никелевого покрытия на Ст.3.

Преимущество комбинированной обработки (поз.8) заключается более, чем в 6-кратном повышении τ_a в сравнении с газопламенным напылением (поз.2). Очевидна

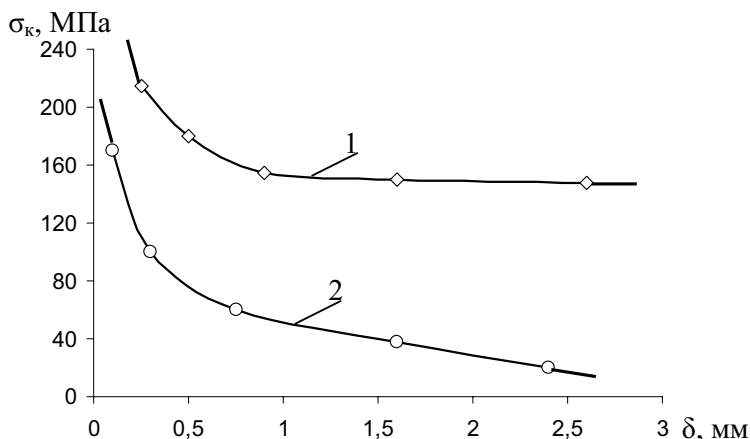
также целесообразность комбинаций технологий поз.1-поз.5 с технологией электроконтактного припекания.



1 – электродуговая металлизация, 2 – газопламенное напыление, 3 – плазменное напыление, 4 – электролитическое осаждение, 5 – детонационное напыление, 6 – электроискровое легирование, 7 – электронно-лучевая конденсация, 8 – газопламенное напыление + электроконтактное припекание.

Рисунок 1- Зависимость адгезионной прочности τ_a от способа нанесения Ni-покрытия на Ст.3

На рис.2 приведена зависимость когезионной прочности σ_k от толщины покрытия δ для варианта газотермического напыления (кривая 1) и интегрированной технологии напыления с электроконтактным припеканием.



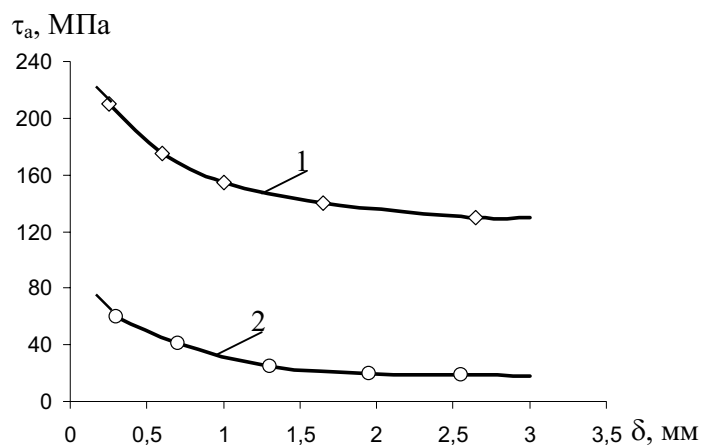
1 – газотермическое напыление (ГТН), 2 – ГТН + электроконтактное припекание

Рисунок 2 - Зависимость когезионной прочности от толщины покрытия

Зависимость адгезионной прочности τ_a от толщины покрытия δ для напыления и комбинации напыления с электроконтактным припеканием приведена на рис.3.

Интегрированная технология газотермического напыления (ГТН) и электроконтактного припекания (ЭКП) обладает рядом преимуществ:

- снижаются требования к механическим свойствам и пористости напыленного слоя. Напыление при этом несет функцию вспомогательной операции;
- уменьшаются припуски на механическую обработку или она исключается. Все газотермические покрытия требуют финишную механическую обработку. Операцию ЭКП напыленного покрытия можно совместить с финишной обработкой пластическим поверхностным деформированием (ППД) до требуемых размеров детали и чистоты поверхности;



1 – ГТН, 2 – ГТН + электроконтактное припекание

Рисунок 3 - Зависимость адгезионной прочности τ_a от толщины покрытия

- возможна замена высоколегированных дефицитных порошков для достижения необходимой твердости и износостойкости покрытия на более дешевые, за счет применения после интегрированной технологии ГТН+ЭКП технологии ионного азотирования (ИА) (рис.4).

Перечисленные преимущества интегрированной технологии ГТН+ЭКП+ИА обеспечивают получение покрытий толщиной $h > 3$ мм при высокой адгезионной прочности τ_a и низком уровне остаточных напряжений.



а)



б)



в)



г)



д)

а) дробеструйная обработка; б) газопламенное напыление; в) активированная электродуговая металлизация; г) электроконтактное припекание; д) вакуумное азотирование

Рисунок 4 - Современный участок интегрированных технологий нанесения покрытий

В комбинациях технологий электроискровой, лазерной и электронно-лучевой обработки с ионным азотированием наблюдается эффект неаддитивности. Предварительная обработка этими первичными технологиями существенно увеличивает азотируемость сталей, глубину упрочненного слоя и обеспечивает многократное повышение твердости и износостойкости в сравнении с ионным азотированием.

Из интегрированных технологий наибольший эффект по несущей способности обеспечивают дуплексные покрытия, сочетающие предварительное глубокое ионное азотирование и наружный тонкий слой сверхтвердого вакуум-плазменного покрытия. Подобная интегрированная технология обеспечила 10-кратное повышение долговечности игольчатых клапанов запорной арматуры, которые изготовлены из стали 12X18H10T и эксплуатируются в условиях высоких контактных давлений и агрессивных технологических расплавах.

Во всех вариантах интегрированных технологий критерием выбора является сравнение затрат и увеличение комплекса механических свойств упрочненных изделий.

Выводы.

Для повышения качества изделий с покрытиями целесообразно применение многооперационных технологий. В настоящее время еще не сложилась методология и теория синтеза многооперационных технологий. В интегрировании технологий преобладает эмпирически-интуитивный подход. Решающими факторами в выборе первичных технологий и завершающих технологическую цепочку является наличие на предприятии отдельных видов оборудования и возможность интегрировать их в единый технологический цикл. Основным недостатком интегрированных технологий является применение для их реализации разнопланового оборудования. Кроме того, нарушение технологии, на одном из этапов технологического процесса, приводит к получению некачественного покрытия.

Список литературы

1. Покрытия и их использование в технике // В кн. «Прочность материалов и конструкций», п/ред. В.Т.Трошенко – 2-е изд. – К.: Академперіодика, 2006. –С.981-1074.
2. Ляшенко Б.А., Мовшович А.Я., Долматов А.И. Упрочняющие покрытия дискретной структуры // Технологические системы – 2001 - № 4 (10). –С.17-25.
3. Новиков Н.В., Бидный А.А., Ляшенко Б.А. и др. Методы упрочнения поверхностей машиностроительных деталей. К.: ИСМ АН УССР, 1989. -112 с.
4. Ляшенко Б.А., Цыгулев О.В., Кузнецов П.Б. Необходимо ли всегда повышать адгезионную прочность защитных покрытий // Пробл. прочности – 1987 - № 5. –С.70-74.
5. Машков Ю.К., Полещенко К.Н., Поворознюк С.Н. и др. Трение и модифицирование материалов трибосистем. М: Наука – 2000 – 280 с.
6. Чердниченко В.С., Радченко В.Г., Радченко Т.Б. и др. Комбинированные электротехнологии защитных покрытий. Новосибирск: Изд-во НГТУ – 2004 – 260 с.
7. Похмурська Г.В., Довгуник В.М., Студент М.М. Зносостійкість лазерно модифікованих електродугових поривів з порошкового дроту ФМІ-2 // ФХММ – 2003 – 39, № 4. –С.61-64.
8. Клименов В.А., Безбородов В.П., Первалова О.Б. и др. Влияние лазерного воздействия на микроструктуру и фазовый состав плазменно-напыленных покрытий на основе никеля // Тез. докл. 4 Междун. конф. «Прочн. И пластик. Матер. в условиях внеш. энерг. воздействия» - Новокузнецк, 11-16 сент., 1995. Новокузнецк – 1995. –С.292.
9. Panin V.E., Klimenov V.A., Bezboroda V.P. et al. Forming the structure and phase composition of coatings by plasma spraying and influence of powerful ultrasound and laser radiation on them // Adv. Mater. and Process.: 2nd Sino-Rus Symp., Xi'an, Oct. 8-13, 1993 — Xi'an, 1994. -С.479-483.
10. Longa Yrene, Shinya Masanobu, Takemoto Mikio. Coatings of aluminide intermetallic compounds on steel utilizing a hybrid technique of spraying and IR-laser fusion // Mater. and Manuf. Processes — 1994 — 9, № 3. -С.495-505.
11. Longa Y., Takemoto M. Laser processing of high-chromium nickel-chromium coatings deposited by

- various thermal spraying methods // *Corrosion (USA)* — 1994 — 50, № 11. -С.827-837.
12. Толочко Н.А., Аршинов К.И., Семашко В.М. и др. Лазерное модифицирование покрытий NiCrFe-50%Cr₃C₂ // *Матер., технол., инструм.* 2001 — 6, № 2. -С.60-63.
 13. Подчерняева И.А. Лазерное оплавление газотермических покрытий на основе кортинита // *Технол. и орган. пр-ва* — 1992 - № 2. -С.42-43.
 14. Глебова М.А., Корнев А.Б., Глебов В.В. и др. Повышение качества газотермических покрытий при термической обработке токами высокой частоты и лазерным лучом // *Свароч. пр-во* — 2004 - № 6. -С.43-46.
 15. Семенов Я.С., Лебедев М.П. К методике создания переходного межфазного слоя в слоистой среде // *Сб. статей 2 междунар. конф. «Деформация и разруш. матер. и наноматериалов», Москва, 2007. М.: Интерконтакт Наука, 2007. -С.394-395.*
 16. Becker R., Sepold G. Nachbehandlung von Spritzschichten durch Hochleistungslaser // *Metalloberfläche* — 1987 — 41, № 7. -С.329-332.
 17. Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Пилипчук А.П. и др. Моделирование многомодового излучения лазера как этап синтеза технологии плавления газотермических покрытий // *Тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. «Новые матер. и технологии НМТ — 2000», Москва, 24-25 окт. 2000. М.: ЛАТМЭС. 2000. -С.206-207.*
 18. Анциферов В.Н., Шмаков А.М., Ившина Н.Н. Лазерная обработка плазменнонапыленных на порошковую сталь покрытий // *Порошк. металлургия* — 1992 - № 10. -С.25-28.
 19. Pat. 6229111 USA, B23K 9/04. Method for laser / plasma surface alloying. Оpubл. 08.05.2001.
 20. Hannotiau M., Leunen J., Sleurs J. et al. Upgrading of plasma sprayed coatings by laser treatment to corrosion resistance and hot isostatic pressing for wear resistance // *Plasma Surface Eng.: Pap. 1st Int. Conf., Garmisch-Partenkirchen, 19-23 Sept., 1988. Vol.1 — Oberursel, 1989. -С.387-394.*
 21. Голубев В.С., Иванов И.А., Чеботько И.С. Лазерное оплавление газотермических покрытий // *Тез. науч.-практ. конф. «Разраб. и применение технол., оборуд. и матер. для газотерм. процессов нанес. защитн. покрытий», Минск, 5-6 июня, 1990 — Минск, 1990. -С.38.*
 22. Kunlin Wang, Zhirui Tian, Chongbin Yang et al. Повышение износостойкости сплавов Al-Si лазерной переплавкой // *Jinshu rechuli = Heat Treat. Metals* — 1994 -№ 10. -С.3-5.
 23. Liang G., Li C., Su J. et al. Микроструктура плазменного покрытия на алюминиевом сплаве после лазерной обработки // *Chin. J. Nonferrous Metals* — 1998 — 8, № 1. -С.28-32.
 24. Погребняк А.Д., Кравченко Ю.А., Василюк В.В. и др. Структура и свойства порошкового покрытия на основе Ni после оплавления поверхности концентрированными потоками энергии // *ФиХОМ* — 2005 - № 1. -С.35-41.
 25. Станчкв Д.И., Винокуров А.В., Бухтояров В.Н. Оплавление газотермических покрытий плазмотроном с модуляцией его параметров // *Леп. В ВИНТИ* 31.10.2001, № 2289-B2001.
 26. Simunovic K., Franz M., Maric G. Investigation and estimation of residual stress in flame sprayed and fused NiCrBSi coatings // *Metalurgija (Zagreb)* — 2008 — 47, № 2. -С.93-97.
 27. Авт. свид. 1675355 СССР, C21D 1/78. Способ обработки деталей. Оpubл. 07.09.91, БИ № 33.
 28. Jie X., Mao Z. Структура и свойства напыленного плазмой покрытия NiCrBSi, переплавленного в печи // *Jinshu rechuli = Heat Treat. Metals* — 1996 -№ 8. -С.15-17.
 29. Шипко А.А., Урбан И.Г. Влияние электронно-лучевого нагрева на структуру и свойства детонационных покрытий // *Весті АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. н.* — 1992 - № 4.-С.8-14.
 30. Прохоренкова Н.В. Структура и свойства покрытий на основе Ni, нанесенных плазменном струей и подвергнутых электронному облучению // *Сб. матер. Междунар. школы — конф. мол. ученых «Физика и химия наноматер.», Томск, 13-16 дек., 2005. Томск: ТГУ, 2005. -С.118-120.*
 31. Белоцерковский М.А., Кукареко В.А., Азизов Р.О. Получение износостойких покрытий активированным газотермическим напылением с последующим модифицированием // *Вопр. материаловед.* — 2004 - № 2. -С.77-87.
 32. Семенова Н.Е., Игнатов М.Н. Методика нанесения композиционных электрохимических покрытий для лазерного модифицирования поверхности // *Вестн. ПГТУ. Мех. технол. матер. и конструкций.* 2003. -№ 6. -С.28-30.
 33. Yang Y., Shen Y., Chen J. et al. Покрытие из нанокристаллического никеля, полученное методом пульсирующего электроосаждения, совмещенного с ультразвуковой активацией // *Jinshu xuebao = Acta met. sin.* — 2007 — 43, № 8. -С.883-888.
 34. Rie K.-T., Methe E., Bulak A. Plasmanitrieren und — nitrocarburierten von galvanisch abgeschiedenen rüßarmen chromschichten und Hartchrom // *Galvanotechnik* — 1995 — 86, № 7. -С.2225-2229.
 35. Dasgupta A., Kuppusami P., Vijayalakshmi M. et al. Pulsed plasma nitriding of large components and coupons of chrome plated SS316LN stainless steel // *J. Mater. Sci.* — 2007 — 42, № 20. -С.8447-8453.

36. Сафронов Р.И. Электросоаждение железоборидных покрытий и их термическая обработка. Автореф. ... канд. техн. наук. Курск. гос. техн. ун-т. Курск – 2007. – 17 с.
37. Чернявский Д.А. Повышение эксплуатационных характеристик железных электролитических покрытий нитроцементацией. Автореф. ... канд. техн. наук. Курск. гос. техн. ун-т. Курск – 2007. – 15 с.
38. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Чудина О.В. и др. исследование поверхности сталей, упрочненных лазерным легированием с последующим азотированием // Матер. и поверхн. упроч. Деталей машин и инструмента для повыш. их надеж. и долговечен. / Моск. автомоб.-дор. ин-т – М., 1989. – С.95-108.
39. Лахтин Ю.М., Чудина О.В. Химико-термическая обработка лазернолугированных сталей // Изв. вузов Чер. Metallургия – 1997 - № 9. –С.64-67.
40. Чудина О.В. Комбинированное поверхностное упрочнение стали (лазерное легирование + азотирование) // МиТОМ – 1994 - № 3. –С.2-5.
41. Чудина О.В. Азотирование лазернолегированных сталей // Сб. матер. 4 Собр. Metalловедов России, Пенза, 23-25 сент., 1998. Ч.1 – Пенза, 1998. –С.90-91.
42. Пат. № 31198 України, С23С 8/02. Спосіб комбінованої лазеро-хіміко-термічної обробки сталевих виробів. Опубл. 25.03.2008, Бюл. № 6.
43. Корнієнко А.О., Яхья М.С., Іщук Н.В. та ін. Формування покриттів триботехнічного призначення комбінованою лазеро-хіміко-термічною обробкою // Пробл. Тертя та зношування: Наук.-техн. Зб. – К.: НАУ, 2008 – Вип. 49. –Т.2. –С.61-65.
44. Пат. 19551 Україна, С23С 8/02. Спосіб комбінованої лазерно-хіміко-термічної обробки матеріалів / М.В.Кіндрачук, Н.В.Іщук, В.М.Писаренко та ін. Опубл. 15.12.06, Бюл. № 12.
45. Пат. 25412 Україна, С23С 8/02. Спосіб отримання зносостійких дискретних азотованих шарів / Кіндрачук М.В., Іщук Н.В., Писаренко В.М. та ін. Опубл. 10.08.07, Бюл. № 12.
46. Кіндрачук М.В., Яхья М.С., Корнієнко А.О. та ін. Визначення параметрів дискретної структури покриттів триботехнічного призначення // Пробл. тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2008, Вип. 50. –С.5-15.
47. Bell T., Bloyce A. Nitriding laser treated titanium bearing low alloy steels // “Нает. Treat.: 84: Proc. Int. Conf., London, 2-4 May, 1984”. London, 1984, 36/1-36/7.
48. Bergmann H.W., Müller D., Amon M. et al. Kombination des Laser-strahlhärtens mit einer Kurzzeitrierbechandlung // Harter. – Techn. Mitt. – 1993 – 48, № 4. –С.238-247.
49. Тарельник В. Іонне азотування квазібагатошарових електроерозійних покриттів // Машинознавство – 1999 - № 6. –С.31-33.
50. Тарельник В.Б., Марцинковский В.С. Упрочнение и ремонт ответственных деталей машин методом электроэрозионного легирования // Тяж. машиностр. – 2005 - № 2. –С.28-32.
51. Вайс Е., Радек Н. Эксплуатационные свойства покрытий типа Cu-Мо и Cu-Ті, модифицированных лазерным лучом // Пробл. тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2008 – Вип. 49. –Т.2. – С.104-111.
52. Бойцов А.Г., Машков В.Н., Смолянец В.А. и др. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами – М.: Машиностроение, 1991. -114 с.
53. Храновская Е.Н. Массоперенос, структурные и фазовые изменения в железе и меди при их легировании в условиях температурных градиентов / Автореф. ... канд. техн. наук, ИМФ им. Г.В.Курдюмова НАН Украины, Киев – 2008. -20 с.
54. Luo Hong, Liu Jiajun, Liu Fen et al. Влияние лазерного упрочнения за счет фазового превращения на ионно-азотированный слой // Chin. J. Lasers. A. – 1995 – 22, № 4. –С.313-316.
55. Tong W.P., Liu C.Z., Wang W. et al. Gaseous nitriding of iron with a nanostructured surface layer // Scr. mater. – 2007 – 57, № 6. –С.533-536.
56. Lin Yimin, Lu Jian, Wang Liping et al. Surface nanocrystallization by surface mechanical attrition treatment and its effect on structure and properties of plasma nitrided AISI 321 stainless steel // Acta mater. – 2006 – 54, № 20. –С.5599-5605.
57. Быковский Н.Г., Сорокина Л.М., Филимонов Г.Н. Повышение долговечности зубчатых передач совмещением азотирования и поверхностного пластического деформирования // Нов. стали и сплавы, режимы их терм. обраб.: Матер. науч.-техн. семин. / О-во «Знание» РСФСР. Ленингр. дом науч.-техн. проп. – Л., 1991. –С.34-35.
58. Лопата Л.А. Разработка технологии нанесения износостойких порошковых покрытий электроконтактным припеканием силовым активированием сдвигом: дис. кандидата техн. наук: 05.16.06 / Лопата Лариса Анатольевна. – Минск, 1989.
59. Багмутов В.П., Калита В.И., Захаров И.Н. и др. Экспериментальные и численные исследования процессов электромеханического упрочнения плазменных покрытий // Сб. статей по матер. 2

- Междун. конф. «Деформ. и разрушение матер. и наноматериалов», Москва – 2007, М.: Интерконтакт Науки, 2007. –С.681-683.
60. Калита В.И., Багмутов В.П., Захаров И.Н. и др. Упрочнение плазменных покрытий электромеханической обработкой // ФиХОМ – 2008. – № 1. –С.38-

Б. Ляшенко, Л. Лопата, Є. Соловух, А. Соловух, А. Ворона

Підвищення довговічності швидкозношуваних деталей робочих органів сільськогосподарської техніки інтегрованими технологіями зміцнюючих захисних покриттів

Показано переваги і недоліки різних поєднань первинних технологій, а також перспективу їх розвитку. В даний час перспективним є поверхневе зміцнення комплексними або комбінованими методами нанесення зносостійких покриттів, нанесення покриттів у поєднанні з модифікацією, нанесення багатшарових, багатфункціональних покриттів; розвиток інтегрованих багатоопераційних технологій. В умовах все зростаючого дефіциту дорогих легуючих матеріалів, що входять до складу сталей і вимагають високого комплексу властивостей міцності, перспективними є інтегровані технології поверхневого зміцнення маловуглецевих сталей

B. Lyashenko, L. Lopata, E. Solovykh, A. Solovykh, A. Vorona

Increase of longevity of worn down details of workings organs of agricultural technique by the integrated technologies of the consolidating sheeting

Advantages and lacks of different combinations of primary technologies, and also prospect of their development, are shown Presently perspective is the superficial consolidating of causing of wearproof coverage's, causing of coverage's, complex or combined methods in combination with modification, causing of multi-layered, multifunction coverage's; development of the integrated much operating-rooms technologies. In the conditions of all increasing deficit of expensive alloying materials, entering in the complement of steel's, requiring the high complex of durability properties, perspective are the integrated technologies of the superficial consolidating of littlecarbon steel's.

Одержано 21.10.11