

УДК 621.923

А.И. ГОРДИЕНКО, акад. НАН Беларуси

Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ВАКУУМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Представлены результаты и анализ работ, выполненных в Физико-техническом институте Национальной академии наук Беларуси в области создания эффективных технологий упрочнения деталей и узлов машиностроения. Приведены физические и механические характеристики материалов, полученных с использованием воздействия лазером, электронным и ионным лучом, импульсной углеродной плазмой. Дана информация об эксплуатационных свойствах полученных материалов, о состоянии и перспективах их использования в машиностроении, инструментальном производстве. Показана перспективность использования экономичных технологий, основанных на высокоэнергетических электрофизических методах обработки материалов — магнито-импульсной и скоростной индукционной обработки. Разработки нашли практическое применение во многих отраслях промышленности, содействуют повышению конкурентоспособности продукции производств Беларуси и расширению их экспортного потенциала.

Ключевые слова: вакуумные технологии, алмазоподобные углеродные покрытия, лазерные технологии, магнито-импульсная штамповка, индукционный нагрев

Эффективным путем повышения эксплуатационной надежности и долговечности деталей и узлов машиностроения является применение упрочняющих технологий, основанных на использовании концентрированных источников энергии. Теоретические и экспериментальные исследования, выполняемые в Физико-техническом институте Национальной академии наук Беларуси (ФТИ НАН Беларуси) в области поверхностного упрочнения металлических материалов с применением индукционного, электронно-лучевого и лазерного нагревов или их комбинирование с традиционными технологиями термической, химико-термической или плазменной обработки, явились основой для разработки и создания новых высокоэффективных процессов, формирования структур с функционально-градиентным распределением свойств по сечению, обеспечивающих повышенный уровень служебных характеристик.

Развитие исследований и разработок в области вакуумных технологий направлено на синтез новых аморфных и наноструктурных композиционных материалов, создание тонкопленочных систем с уникальными физическими и механическими свойствами, способных обеспечить рекордные свойства композиции «основа — покрытие», в первую очередь высокие термическую стабильность и коррозионную стойкость, твердость и износостойкость.

В Физико-техническом институте успешно развиваются исследования процессов формирования многофункциональных алмазоподобных углеродных (АПУ) покрытий из углеродной плазмы импульсного катодно-дугового разряда в вакууме [1]. Созданы технологии, позволяющие получать без нагревания подложек покрытия толщиной до 2 мкм с высокой адгезией на углерод-

дистых и инструментальных сталях, алюминии и его сплавах, меди, стекле, полимерах и других материалах (рисунок 1).

Основные свойства формируемых покрытий приведены в таблице.

Реализуется новый оригинальный метод комбинированного физического и химического осаждения тонких алмазоподобных углеродных пленок и покрытий (PVD-CVD метод) путем разложения молекул газообразного углеводорода высокоинтенсивным импульсным катодно-дуговым разрядом, имеющий ряд преимуществ по сравнению с традиционными физическими и химическими методами осаждения. Кроме высокой производительности процесса нанесения, многократного снижения внутренних остаточных напряжений, существенного увеличения равномерности покрытий, метод отличается гибкое управление структурой покрытий и типом химических связей между атомами углерода. В частности, возможно получение АПУ-по-

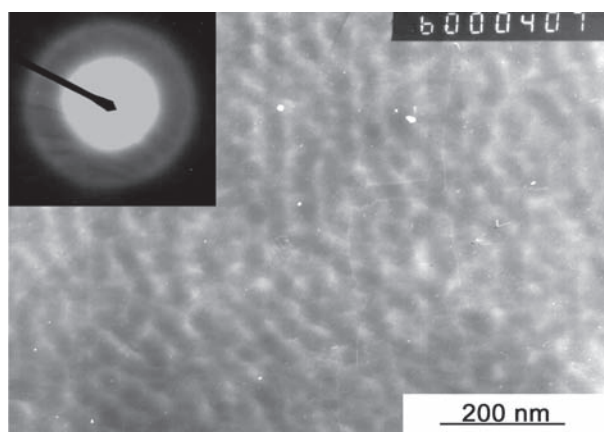


Рисунок 1 — Фотография микроструктуры АПУ-покрытия, полученная с помощью просвечивающего электронного микроскопа

Таблица — Характеристики АПУ пленок

Толщина, нм	50...2500
Плотность, г/см ³	2,9...3,2
Твердость, ГПа	60...85
Модуль Юнга, ГПа	650...950
Шероховатость Ra, нм	0,2...0,5
Коэффициент трения	0,1...0,4
Термостабильность, °C	до 300...350

крытий с регулируемым содержанием кремния. Анализ типов химических связей показал, что кремний в покрытии в основном связан с углеродом в виде карбида кремния, наличие которого существенно — до 500 °C — увеличивает температурную стойкость. Коэффициент бесшарового трения покрытий Si-АПУ может варьироваться от 0,19 до 0,42 в зависимости от условий получения и термообработки [1]. Изображение поверхности покрытия представлено на рисунке 2.

Такие материалы, в зависимости от налагаемых требований, формируются без наличия водорода, а также с регулируемым содержанием водорода, с заданным соотношением алмазоподобной sp^3 - и графитоподобной sp^2 -связей, и, соответственно, с возможностью регулирования физико-механических характеристик. В частности, микротвердость таких покрытий можно изменять в зависимости от условий получения в диапазоне от 1 до 90 ГПа.

Обнаружено существование на поверхности тонких АПП-покрытий слоя толщиной в несколько нанометров, состоящего главным образом из sp^2 гибридного углерода. Это подтверждает предположения о формировании алмазоподобной фазы углерода из плазменных потоков посредством субимплантации высокоэнергетических ионов углерода. Установлено, что присутствие азота в АПП-

покрытии позволяет снизить уровень остаточных напряжений в нем более чем в 8 раз, что дает возможность существенно увеличить как толщину покрытий без его самопроизвольного разрушения, так и рабочий ресурс изделий с такими покрытиями. Азотсодержащие АПП-покрытия обладают низким коэффициентом трения, что связано с существованием поверхностного слоя, обогащенного графитоподобной фазой.

Исследовано триботехническое поведение АПУ-покрытий в различных условиях, в том числе при сухом трении в атмосферных условиях, в сухом азоте и в вакууме. Покрытия АПУ наносили на плоские образцы из сталей Р6М5, ШХ15, AISI 52100 и др. Схемы трения: «палец — диск» и «шар — диск». АПУ-покрытия показали малые значения коэффициента трения при испытании в атмосферном воздухе ($\mu = 0,08$ при трении Р6М5 с покрытием АПУ и алмазной сферы: $\mu = 0,075$ при трении AISI 52100 с покрытием АПП с шариком из стали AISI 52100 без покрытия) и сверхнизкие значения в вакууме.

Полученные АПУ-материалы нашли промышленное применение в качестве упрочняющих износостойких покрытий изделий машиностроения и инструментария. К примеру, срок службы микро-сверл и фрез из твердого сплава для обработки печатных плат увеличивается в 1,8—2 раза при существенном улучшении качества обработки. Особо эффективным оказалось применение АПУ-покрытий для мерительного инструмента (плитки Иогансона, калибры-пробки, концевые меры): срок службы увеличивается в 2 ÷ 2,5 раза. В случае нанесения покрытий на подвижные части литейных форм, работающих в условиях сухого трения, достигается двойной эффект: предотвращается налипание пластмассы на форму и снижается коэффициент трения и износ трибопар. Высокую эффективность АПУ-покрытия показали при их использовании в плунжерных парах и поршнях дизельных двигателей, деталях распределительных валов.

В ряду промышленно значимых высокоэнергетических процессов прочно заняла позиции лазерная технология. Производительность труда на операциях размерной обработки (сверление, резка) с применением лазерного излучения в сравнении с традиционными методами возрастает в 4—6 раз. В Беларуси лазерные технологии находят применение не только в машиностроении, но и в металлообработке, инструментальном производстве, электронной промышленности. Освоены технологии лазерной резки материалов, широко применяются лазеры для нагрева при термообработке, наплавке, сварке, гравировке, селективном спекании.

В ФТИ НАН Беларуси накоплен большой опыт по лазерной наплавке, легированию и модифицированию различных сталей и сплавов. Лазерная наплавка позволяет значительно снизить трудоемкость и себестоимость изготовления за счет исключения предварительного подогрева, последующей термооб-

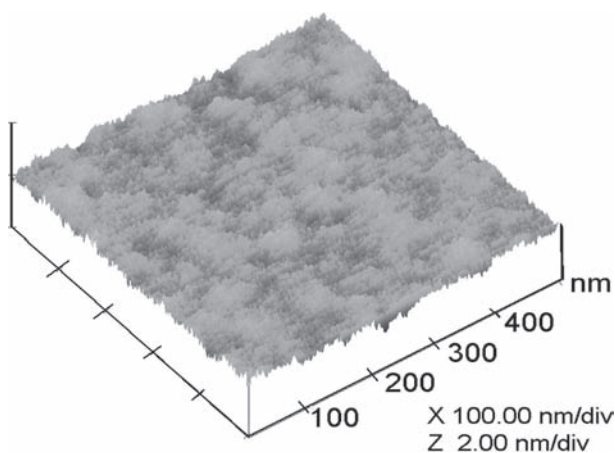


Рисунок 2 — Изображение поверхности АПУ-покрытия, полученное на атомно-силовом микроскопе

работки, а также значительного уменьшения объема последующей механообработки. При этом можно увеличивать износостойкость деталей и штамповой оснастки после лазерной обработки в 3–4 раза. В качестве легирующих материалов используются порошки металлов, неметаллов, карбидов, боридов, силицидов и др. Введение различных легирующих элементов при лазерной обработке приводит к существенному изменению эксплуатационных характеристик материала за счет изменения его химического состава и структурно-фазового состояния.

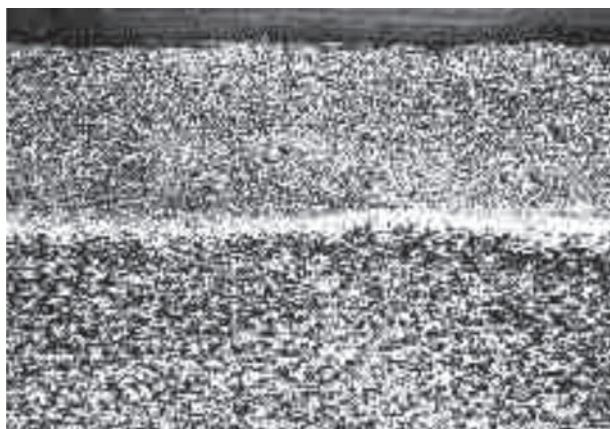
На рисунке 3 приведены типичные структуры, формирующиеся при использовании энергии лазера для создания износостойких поверхностных слоев. При лазерном модифицировании на поверхности образуется наплавленный износостойкий слой, содержащий легированный твердый раствор основы наплавки с остаточными нерастворившимися упрочняющими частицами карбидных, боридных и других соединений. Легированный твердый раствор износостойкой наплавки имеет твердость 12 700–16 000 МПа. Твердость нера-

створившихся остаточных упрочняющих частиц достигает 25 000–28 000 МПа. Глубина наплавленного слоя ~ 0,2 мм, глубина упрочненного слоя подложки ~ 0,2 мм. На границе «слой — подложка» имеется узкая полоска переходной зоны со значительным снижением твердости (~ 4500 МПа) шириной ~ 0,02 мм (см. рисунок 3). Ее появление связано, вероятно, с тем, что углерод приграничного слоя подложки диффундирует в наплавленный слой и откладывается на имеющихся остаточных карбидных частицах, служащих готовыми центрами кристаллизации либо образует их в приграничной зоне, где происходит частичное оплавление подложки и смешение расплавов слоя и подложки. Суммарная глубина упрочнения при лазерном модифицировании составляет 0,4–0,5 мм. Наличие аустенитной прослойки на границе раздела «слой — подложка» оказывает положительное влияние на свойства переходного слоя, улучшая адгезию, уменьшая растягивающие и скалывающие напряжения [2].

Лазерная технология упрочнения применима к весьма широкой номенклатуре деталей. Создан перспективный метод повышения износостойкости деталей машин лазерным модифицированием с одновременной закалкой поверхностного слоя. К его особенностям относится возможность внедрения в кристаллическую решетку даже таких легирующих элементов, которые не могут образовывать твердого раствора с основными компонентами. Получаемые метастабильные структуры, прочно связанные с основой и обладающие сверхвысокой твердостью, обеспечивают резкое повышение износостойкости. Технологии перспективны для упрочнения и восстановления различной технологической оснастки, для лазерной наплавки контактных поверхностей бандажных полок турбинных лопаток, быстроизнашивающихся деталей весьма широкой номенклатуры в автотракторостроении и сельхозмашиностроении. Метод наплавки высоколегированных порошков с использованием лазерного излучения обеспечивает восстановление локальных выработок с одновременным повышением механических свойств поверхности. При наплавке износостойкость поверхностных слоев может быть повышена в 2–3 раза. По сравнению с традиционными методами наплавки лазерная наплавка обеспечивает минимальную зону термического влияния, значительное снижение остаточных деформаций в детали, минимальное перемешивание наплавляемого материала с материалом основы. К примеру, использование лазерной закалки деталей подвески заднего моста автомобиля МАЗ (кронштейнов, проушин) позволило повысить долговечность последних в 3 раза. На ОАО «Борисовский завод «Автогидроусилитель» создан участок, внедрены технология и оборудование для лазерного упрочнения быстроизнашивающихся деталей рулевого



а



б

Рисунок 3 — Типичные структуры слоев, получаемых методом лазерной наплавки и легирования:

а — лазерная наплавка самофлюсующихся сплавов на никелевой основе (твердость 57–61 HRC); б — лазерное легирование боридом вольфрама W2B5 (твердость 62–67 HRC)

механизма, что позволило предприятию освоить производство современных механизмов для автомобилей семейства МАЗ, ГАЗ, КАМАЗ.

Перспективно использование лазерного упрочнения в инструментальном производстве. Так, упрочнение режущего и холодновысадочного инструмента, деталей прессо-штамповой оснастки позволяет повысить их стойкость в 3—5 раз.

Применение технологии лазерного упрочнения к ножам и фильерам для обрезки и протяжки проволоки позволило повысить ресурс их работы в 10 раз. Решаются задачи не только материаловедческого характера, но и физики взаимодействия лазерного излучения с материалами поверхностного плазмообразования. Полученные результаты позволили разработать методы целенаправленного насыщения поверхностных слоев как элементами, так и сложными химическими соединениями, создавать широкий спектр легированных и наплавленных композиционных структур, обеспечивать получение комплекса регламентированных механических и физико-химических свойств поверхностей материалов. Созданы методы упрочняющей обработки металлов и сплавов, применяемых для изготовления быстроизнашивающихся узлов сельскохозяйственной техники [2].

Разработаны технологии и изготовлены опытные партии ножей измельчающих аппаратов кормоуборочных комбайнов типа «Ягуар», ножей ротационных косилок, сегментных ножей кукурузных жаток «CHAMPION 360», ножей для дообрезки ботвы свеклоуборочных комбайнов и др. Проведенные испытания показали, что достигнуты результаты на уровне лучших европейских аналогов, при этом стоимость деталей в среднем на 30—50 % ниже импортных образцов.

В современных рыночных условиях одним из определяющих условий конкурентоспособности производства является способность в кратчайшие сроки реагировать на конъюнктуру рынка, с минимальными затратами осваивать производство новых изделий высокого качества.

Достигнуть этой цели позволяет использование новых наукоемких технологий, основанных, в частности, на высокоэнергетических электрофизических методах импульсной обработки, когда источником высокого давления служат электрический взрыв проводников, электрогидравлический эффект, сильное импульсное магнитное поле.

Перспективным является использование технологии магнитно-импульсной обработки материалов (МИОМ) в листоштамповочном производстве, штамповочно-сборочном производстве при изготовлении изделий из тонкостенных трубчатых и листовых заготовок путем выполнения разделительных, формовочных или соединительных операций.

В ФТИ НАН Беларуси сформировано направление в области штамповки тонколистовых материалов с использованием ударных нагрузок, по мно-

гим позициям занимающее одно из ведущих мест в мире. Для реализации технологии разработано специализированное оборудование ударной штамповки жидкой и эластичной средами, а также магнитно-импульсные прессы. Конструкции прессов, их отдельные узлы и технологические схемы штамповки защищены многочисленными авторскими свидетельствами и патентами Беларуси и промышленно развитых стран (около 100 изобретений).

По сравнению с традиционной технологией штамповки на механических прессах и рядом других импульсных методов магнитно-импульсная обработка материалов открывает возможности получения детали сложной формы за один переход, штамповки в одной матрице деталей различной толщины, управления импульсом давления в широких пределах как по амплитуде, так и по времени его действия. Обеспечивается относительно низкая стоимость технологической оснастки (в 2—4 раза дешевле инструментальных штампов), сокращение в 2-3 раза срока освоения новой продукции, увеличение КПД процесса — до 40 %.

Перспективными областями использования оборудования МИОМ являются процессы горячей штамповки металлов, высокоскоростной сварки, воздействия импульсного магнитного поля на структурно-фазовые преобразования в материалах, повышения стойкости режущего инструмента, очистки изделий, систем и сооружений от окалин, накипи, льда, слежавшихся сыпучих материалов, дробления твердых пород, уплотнения грунтов и др. Примером практического использования разработки является ее освоение на производственных участках МИОМ на автомобильных заводах Беларуси: МЗКТ, МАЗ, БелАЗ, МАРЗ.

Традиционным направлением работ института является создание и освоение новых технологий упрочнения сложно-профильных деталей машин путем бездеформационной контурной закалки токами высокой частоты. Использование созданных технологий позволило осуществить замену дорогостоящих сталей на более дешевые экономно-легированные, повысить качество термообработки за счет предотвращения закалочных трещин и деформаций, управлять распределением прочности по сечению детали [3]. Это особенно актуально для таких деталей автомобилей и тракторов, как цилиндрические прямозубые зубчатые колеса с наружным и внутренним зубом, цилиндрические косозубые колеса, конические зубчатые колеса с прямым и круговым зубом, зубчатые рейки (рисунки 4).

Создание и внедрение новых технологий упрочнения методом высокочастотного индукционного нагрева деталей автомобилей, тракторов и станков на крупнейших машиностроительных предприятиях Беларуси (МАЗ, БелАЗ, МТЗ, МЗКТ) обеспечивает годовую экономию электроэнергии не менее 8—10 млн кВт·ч, газа — 60—100 тыс. м³, снижение себестоимости деталей на 25—30 % [4].

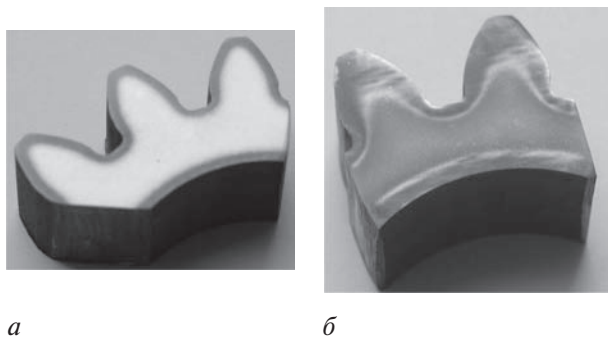


Рисунок 4 — Макроструктура упрочненного слоя детали «сателлит»: *а* — сталь 20ХН3А после цементации; *б* — сталь 60ПП после объемно-поверхностной закалики

В настоящее время ФТИ НАН Беларуси в рамках Программы технического переоснащения и модернизации литейных, термических гальванических и других энергоемких производств на 2010—2015 годы, утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь, является головной организацией по научно-техническому сопровождению программы переоснащения промышленных предприятий, использующих индукционное оборудование. В составе ГНТП ведется разработка полупроводниковых генераторов частоты в модульном исполнении с частотой от 2,4 кГц до 66 кГц и мощностью до 250 кВт, автоматизированных комплексов индукционного нагрева для термообработки и нагрева под деформацию металлов

и сплавов, планируется проведение сертификации оборудования индукционного нагрева и производственного участка по его изготовлению. Комплекс, включающий преобразователь частоты, нагревательную установку и программируемый блок управления и контроля, в 2011 году был изготовлен на базе ФТИ НАН Беларуси и введен в эксплуатацию на Минском станкостроительном заводе для термообработки длинномерных станин.

Оборудование не уступает зарубежным аналогам по техническим характеристикам, на 28—30 % дешевле. По экспертной оценке Министерства промышленности Республики Беларусь потребность в автоматизированных комплексах индукционного нагрева составляет 20—25 ед./год.

Список литературы

1. Чекан, Н.М. Алмазоподобные углеродные покрытия из сепарированных потоков импульсной плазмы / Н.М. Чекан, И.П. Акула // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. — 2011. — № 2 — С. 28—35.
2. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин / И.Н. Шило [и др.]. — Минск: БГАТУ, 2010. — 320 с.
3. Исследование влияния режимов скоростной термической обработки на структуру и механические свойства трубной стали 32Г2 / А.И. Гордиенко [и др.] // Литье и металлургия. — 2012. — № 1. — С. 43—48.
4. Михлюк, А.И. Индукционная термическая обработка: анализ, состояние, перспективы развития / А.И. Михлюк, А.И. Гордиенко, И.И. Вегера // Литье и металлургия. — 2010. — № 1. — С. 86—88.

Gordienko A.I.

Application of high-energy and vacuum technologies for strengthening the engineering parts.

The results and analysis of the research activities performed by Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences in the field of development of efficient technologies for strengthening mechanical engineering parts and units have been presented. The physical and mechanical characteristics of the materials obtained by exposure to laser, electronic and ion beams and pulsed carbon plasma have been described. The data on the performance characteristics of the obtained materials, the state and prospects for their application in mechanical engineering and tool manufacturing have been presented. It has been shown that there are good prospects for application of the resource saving technologies based on high-energy electrical physical methods of material processing such as magnetic pulse and high-speed induction processing. The research works have found their practical application in many industries and contribute to increasing of the competitiveness of the products manufactured by Belarusian enterprises and to extending of their export potential.

Поступила в редакцию 17.08.2012.