

УДК 29.27.39

А.М. Жукешов, Н.Н. Коваль, А.У. Амренова*,
А.Т. Габдуллина, М. Мухамедрыскызы

НИИ экспериментальной и теоретической физики
КазНУ им. аль-Фараби, Республика Казахстан, Алматы
*E-mail: a_gabdullina@mail.ru

Перспективы упрочнения металлических материалов с применением импульсных плазменных и электронных пучков

В статье рассматриваются вопросы разработки ресурсосберегающей, экологически чистой технологии создания изделий из конструкционных и инструментальных сталей и сплавов с заданными свойствами поверхности. Эффект может быть достигнут с применением импульсных систем плазменной и электронно-пучковой обработки, которые более эффективны и технологичны, чем стационарные системы. В результате будут сформированы слои, включающие интерметаллидные, карбидные и нитридные фазы, которые имеют изменяющуюся с глубиной структуру от нанокристаллической на поверхности до субмикроструктурной в глубине. Полученные на поверхности материалов с помощью плазменных и электронных ускорителей наноструктурированные, упрочняющие слои уникальны и позволяют добиться в разы более высоких прочностных свойств и ресурса работы изделий по сравнению с традиционными технологиями (твердость до 50 ГПа), и не могут быть получены другими способами. Промышленная апробация показала, что после модифицирования рабочих поверхностей работоспособность инструмента и деталей машин повышается в 3-5 раз. Технология может быть использована во всех областях, где требуются особо прочные свойства поверхности материалов, от машиностроения до космической отрасли.

Ключевые слова: плазменная обработка, металлические сплавы, импульсный электронный пучок, трибология.

A.M. Zhukeshov, N.N. Koval, A.U. Amrenova, A.T. Gabdullina, M. Mukhamedryskyzy
To select a component for solar power plant with stirling engines

The article discusses the development of resource-saving, environmentally friendly technologies for creating products of structural and tool steels and alloys with given properties of surface. This effect can be achieved using pulsed plasma systems and electron beam treatment, which are more effective and manufacturable than the stationary systems. In the result will be formed layers comprising intermetallic, carbide and nitride phases that are changing the depth of the nanocrystalline structure on the surface to a depth submicrocrystalline. The using plasma and electron accelerators resulting surface material nanostructured, are unique and can achieve several times higher strength properties and service life of the products compared with traditional technologies (hardness 50 GPa) and can not be obtained in other ways. Industrial testing showed that after the operation of modifying the working surfaces of tools and machine parts is increased in 3 ... 5 times. The technology can be used in all areas that require extra strong surface properties of materials, from engineering to the space industry.

Key words: Plasma treatment, metal alloys, pulsed electron beam, tribology.

Ә.М. Жукешов, Н.Н. Коваль, А.У. Амренова, А.Т. Габдуллина, М. Мухамедрысқызы
**Импульстік плазмалық және электрондық бумалармен метал қоспалардан
 жасалған материалдарды беріктіру болашағы**

Мақалада беттік қабатының қасиеттері берілген конструкциялық және аспаптық болаттардан, сонымен қатар құймалардан жасалған бұйымдардың ресурстық және энергиясақтаушы, экологиялық таза технологиясын жасау болашағы талқыланады. Плазмалық және электрондық-сәулелік өңдеудің импульстік жүйесін қолдану арқылы нәтижеге қол жеткізіледі. Мұндағы жүйе стационарлық жүйеге қарағанда нәтижелі және технологиялы. Нәтижесінде интерметаллидті, карбидті және нитридті фазалары бар қабаттар құрылады. Бұл қабаттар құрылымды нанокристаллдық тереңдіктен субмикрокристаллдық тереңдікке дейін өзгерте алады. Плазмалық және электрондық үдеткіштердің көмегімен алынған материалдардың наноқұрылымды, қатайған қабаттары бірегей және сонымен қатар дәстүрлі технологиялармен (қаттылық 50 ГПа дейін) салыстырғанда бұйымдар жасау қоры мен олардың бірнеше есе жоғары берік қасиеттеріне қол жеткізуге мүмкіндік береді, басқа әдіспен алынуы мүмкін де емес. Өнеркәсіптік апробация аспап пен машина детальдарының жұмыс жасайтын беттік қабатын модификациялағаннан соң олардың жұмыс жасау қабілетінің 3...5 есе артатынын көрсетті. Бұл технология көптеген сала төңірегінде, әсіресе материалдың беткі қабатының аса берік қасиетін талап ететін машина жасау саласынан ғарыштық салаға дейін қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: Плазмалық өңдеу, метал қоспалары, импульстік электрондық бума, трибология

Введение

В современном мире всё большее значение приобретают ресурсо- и энергосберегающие экологически чистые технологии создания материалов с заданными свойствами. В развитых странах уделяется большое внимание исследованиям в области вакуумных и плазменных (ионно-плазменных) технологий. Особенностью этих технологий является низкая стоимость сырья и высокая стоимость технологии в конечном продукте. Применение прогрессивных плазменных технологий в отраслях машиностроения, транспорта и энергетики, приводит к экономии дорогих сортов сталей и цветных металлов, повышает качество изделий и конкурентоспособность товара, снижает отходы производства.

Среди разнообразных методов вакуумно-плазменной модификации поверхности наиболее отработанными можно считать технологии магнетронной и дуговой обработки [1, 2]. Однако они имеют ряд недостатков, такие, как использование вредных газов, низкая скорость обработки, нагрев катодов и т.д. В последнее время активно разрабатываются импульсные системы плазменной обработки, от которых ожидают более эффективных результатов [3]. Научно-технический потенциал импульсных технологий обусловлен преимуществами импульсных систем:

- высокая технологическая эффективность метода за счет концентрации потока мощности;
- простота и универсальность источника плазмы, малое потребление энергии;
- сочетание сверхбыстрой закалки и легирования в одном процессе;

- возможность обработки криволинейных поверхностей изделий;
- отсутствие специальной предварительной обработки.

В технологии не используются вредные для окружающей среды вещества, полностью отсутствуют выбросы в атмосферу. Чистота технологии обеспечивается применением вакуума. Все это обеспечивает экологическую безопасность разрабатываемой технологии.

Плазменные ускорители

В последние десятилетия концентрированные потоки энергии активно используются для модификации и легирования поверхностных слоев металлических и полупроводниковых материалов. Широко применяются сильноточные электронные пучки [4], мощные ионные пучки [5], непрерывные и импульсные лазерные лучи [6], высокотемпературные импульсные плазменные потоки [7]. Результаты последних исследований [8-10] показали, что высокоэнергетическая обработка материалов приводит к существенному изменению микроструктуры (протеканию процессов наноструктурирования) и фазового состава (выделение мелкодисперсных вторых фаз, формирование метастабильных фаз и пр.) модифицированных слоев в результате протекания неравновесных процессов при высоких скоростях охлаждения ($10^5 - 10^7$ К/с) расплавленного высокоэнергетическим потоком тонкого (1–10 мкм) поверхностного слоя материалов.

Следует отметить, что плазменные ускорители большой мощности в Казахстане и Беларуси [11-15] являются уникальными установками, обладающими совокупностью параметров, не имеющих аналогов в мире. Импульсные плазменные ускорители обеспечивают следующие параметры плазмы: температура плазмы от 10^4 до 10^6 К, плотность от 10^{12} до 10^{18} см⁻³, скорость потока заряженных частиц 10^4 - 10^5 м/с. Длительность воздействия импульса составляет несколько микросекунд, плотность мощности до 10^7 Вт/см². Эти параметры позволяют обрабатывать поверхность любых материалов, от графита до титана. Методика обработки основана на сверхбыстром энергетическом воздействии плазменных потоков на поверхностные слои материала. Основными эффектами воздействия импульсной плазмы на материал являются нагрев поверхности до высокой температуры, плавление и закалка. В результате быстрой закалки формируется нанокристаллический или квази-аморфный слой с улучшенными физическими характеристиками. За счет тепловых, звуковых и магнитных эффектов глубина воздействия может достигать 100 мкм и более в глубь матрицы. Одновременно с энергетическим воздействием возможно внедрение частиц плазмы в приповерхностные области обрабатываемого материала.

Полученные с помощью плазменных ускорителей наноструктурированные, упрочняющие слои уникальны и позволяют добиться в разы более высоких прочностных свойств и ресурса работы изделий по сравнению с традиционными технологиями (твердость до 50 ГПа), и не могут быть получены другими способами. Промышленная апробация показала, что после модифицирования рабочих поверхностей работоспособность инструмента и деталей машин повышается в 3-5 раз. В зависимости от состава высокоэнергетического потока поверхностный слой может иметь высокие антифрикционные свойства, теплостойкость, износостойкость, коррозионную стойкость.

В рамках дальнейшего совершенствования технологии ставится новая задача по разработке комплексной методики, основанной на возможности модификации материалов под воздействием импульсных потоков энергии при предварительном нанесении на поверхность слоев металлов, карбидов металлов за счет дополнительного легирования ими формирующего сплавленного слоя. Кроме того, в зависимости от состава легирующего слоя и плотности плазменного потока созданный поверхностный слой мо-

жет иметь высокие антифрикционные свойства, теплостойкость, износостойкость, коррозионную стойкость [9, 10, 16].

Дополнительные возможности в создании слоев с уникальными свойствами создает электронно-пучковое воздействие на модифицированные плазменными потоками слои материалов, реализующее совместные процессы наноструктурирования, сглаживания и полирования поверхностных слоев [10, 19, 20]. Применение интенсивных импульсных электронных пучков для модификации поверхности материала является технологией с большими перспективами (уменьшение изнашивания, увеличение коррозионной стойкости и сопротивляемости окислению, усталости и т.д.). Для реализации определенной технологии необходимо обеспечить электронный пучок с оптимальным набором параметров. Анализ известных типов электронных источников позволяет рационально выбирать определенный источник, учитывая его технологические возможности.

Электронные источники на основе взрывоэмиссионного катода применяются для модификации поверхности металлических и металлокерамических материалов и изделий. Примером использования таких источников является разработанная и изготовленная в ИСЭ СО РАН (г. Томск) электронно-лучевая установка РИТМ [21]. Также для модификации поверхности различных материалов могут использоваться высокоэнергетичные (энергия электронов 50-400 кэВ) электронные источники на основе взрывоэмиссионного катода, позволяющие генерировать электронный пучок с длительностью импульса (5-250) мкс, током 200-500 А, плотностью энергии у подложки 500 Дж/см². На их основе в ФГУП НИИЭФА им. Д.В. Ефремова (г. Москва) построен ряд установок под общим названием GESA [22]. Рациональнее, чем в источниках с взрывоэмиссионными катодами, в источниках с плазменными катодами решается задача получения пучка сечением в несколько см² в микро- и субмиллисекундном диапазоне длительностей импульса [23, 24]. Примером использования высокоэнергетичного электронного источника с полым плазменным катодом является электронная пушка, разработанная в исследовательской лаборатории 3011 (г. Малибу, США) [25]. Использование полого плазменного катода дает возможность генерации высокой плотности эмиссионного тока 10-100 А/см² и большой длительности импульсов (> 100 мкс). Работа

электронного источника [26], разработанного в Израильском технологическом институте (г. Хайфа, Израиль) основана на использовании полого плазменного анода в качестве эмиттера при извлечении из плазмы импульсного электронного пучка. Источник позволяет генерировать электронный пучок с площадью поперечного сечения 100 см^2 , амплитудой тока пучка до 1,2 кА, ускоряющим напряжением до 250 кВ и длительностью импульса до 400 нс без формирования взрывоэмиссионной плазмы на поверхности выходной сетки. Разработанный в ИСЭ СО РАН (г. Томск) электронный источник с плазменным катодом на основе импульсного дугового разряда [27] позволяет генерировать импульсный электронный пучок с током 100-1600 А, длительностью импульса до 45 мкс, энергией электронов до 15 кэВ. Импульсная электронно-пучковая установка СОЛО [28], созданная в ИСЭ СО РАН (г. Томск), с электронным источником на основе импульсного дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы катодной плазмы и открытой границей анодной плазмы позволяет генерировать электронный пучок с током до 300 А, энергией электронов до 25 кэВ, длительностью импульса 20-200 мкс, плотностью энергии в импульсе до 80 Дж/см^2 , частотой следования импульсов до 15 с^{-1} .

Источники импульсных сильноточных электронных пучков представляют значительный интерес, прежде всего, в связи с перспективностью их использования для поверхностной обработки материалов, повышения износостойкости режущего инструмента, увеличения усталостной прочности лопаток турбин и компрессоров, повышения коррозионной стойкости металлических материалов, увеличение электрической прочности вакуумной изоляции и др., и нуждаются в дальнейшем изучении и технологическом совершенствовании. Известными методами упрочнения поверхности изделий, кроме импульсного электронно-пучкового облучения, являются ионная имплантация, нанесение износостойких покрытий, азотирование, обработка потоками плазмы и мощными ионными пучками, облучение лучами лазера и др. К основным преимуществам импульсного электронно-пучкового облучения, по сравнению с традиционным видом воздействия концентрированным потоком энергии на поверхность – лазерным, можно отнести значительно более высокий коэффициент полезного действия (до 90%) электронных источников, высокую эффективность

энерговклада в поверхностный объем материала (малый коэффициент отражения электронов), возможность полного контроля и управления всеми параметрами облучения при высокой степени локализации энергии в поверхностном слое, значительно большую (до 10 см^2) площадь поверхности, обрабатываемой за импульс. По сравнению с мощными ионными пучками, которые также могут использоваться для модификации поверхности материалов, низкоэнергетические ($<30 \text{ кэВ}$) плотные электронные пучки генерируются в частотно-импульсном (до 10 Гц) режиме при меньших (на порядок величины) ускоряющих напряжениях и не требуют создания специальной радиационной защиты, так как сопутствующее рентгеновское излучение экранируется стенками рабочей вакуумной камеры. Высокая энергетическая эффективность, более высокая однородность плотности энергии по сечению потока, хорошая воспроизводимость импульсов и высокая частота их следования выгодно отличают импульсные электронные пучки также и от импульсных потоков низкотемпературной плазмы при потенциальном использовании тех и других в технологических целях. Таким образом, следует ожидать, что использование электронных пучков (импульсные низкоэнергетические, сильноточные плотные электронные пучки) приведет к дальнейшему развитию комбинированных технологий упрочнения металлов и сплавов и позволит достигать эффектов, которые не могут быть реализованы с использованием альтернативных методов.

Заключение

Таким образом, для достижения новых результатов в данной области перспективно разработать технологию создания новых изделий из конструкционных и инструментальных материалов (образцы сталей, твердых сплавов) с упрочненной поверхностью, с использованием импульсных и квазистационарных (компрессионных и эрозионных) потоков плазмы, высокоинтенсивных электронных пучков.

Этого можно достигнуть на уникальных установках Казахстана, Беларуси и России, обладающих импульсными плазменными и электронными ускорителями, которые по совокупности основных параметров (плотность энергии потоков плазмы, пучков электронов, длительность и частота следования импульсов) существенно превосходят известные отечественные и зарубежные аналоги.

References

- 1 Lieberman M.A., Lichtenberg A.G. Principles of plasma discharges and materials processing. John Wiley & Sons Inc., New York, 1994, 450 p.
- 2 Морозов А.И. Плазмодинамика. Техносфера. -2004. - 524 с
- 3 Piękoszewski J. Present status and future of pulsed plasma processing of materials in SINS // NUKLEONIKA. – 2000. - 45 (3). – С.193-197.
- 4 Ласковнев А.П., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А., Коваль Н.Н., Углов В.В., Черенда Н.Н., Бирик Н.В., Асташинский В.М. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой. Белорусская наука, Минск, 2013. - 287 с.
- 5 Richter E. et al. Modification of titanium surface by its alloying with silicon using intense pulsed plasma beams. // Surface and Coatings Technology. – 2002. – Vol. 158-159. – P. 324-327.
- 6 Tomida S., Nakata K. Fe–Al composite layers on aluminum alloy formed by laser surface alloying with iron powder. // Surface and Coatings Technology. – 2003. – Vol. 174-175. – P. 559-563.
- 7 Углов В.В., Черенда Н.Н., Анищик В.М., Асташинский В.М., Квасов Н.Т. Модификация материалов компрессионными плазменными потоками. Минск: БГУ, 2013. - 248 с.
- 8 Tereshin V.I. at al. Pulsed plasma accelerators of different gas ions for surface modification. // Rev. Sci. Instrum. – 2002. -V.73. - №2. - P.1- 3.
- 9 Патент 16907 РБ Способ упрочнения поверхности изделия из титанового сплава. МПК C23C14/48, C23C8/24 / Углов В.В., Черенда Н. Н., Шиманский В. И., Подсобей Г. З., Асташинский В.М. Заявитель – Белорусский государственный университет - № a20110343; заявл. 21.03.2011. Опубл. 28.02.2013. // Афіцыйны бюл. Нац.цэнтр інтэлектуал.уласнасці. - 2013. - № 1 (90). С.95.
- 10 Uglov V.V., Kuleshov A.K., Soldatenko E.A., Koval N.N., Ivanov Yu.F., Teresov A.D. Structure, phase composition and mechanical properties of hard alloy treated by intense pulsed electron beams. //Surface and Coatings Technology, Vol. 206, Iss. 11–12, 2012, P. 2972-2976.
- 11 Zhukeshov A. M. Plasma flow formation in a pulse plasma accelerator in continuous filling regime. Plasma Devices and Operations. Vol. 17. N.1. 2009.p.73-81
- 12 Baimbetov F. B., Zhukeshov A. M. and Amrenova A. U. Dynamics of Plasma Flow Formation in a Pulsed Accelerator Operating at a Constant Pressure. Technical Physics Letters, 2007. - Vol. 33, No. 1. - P. 77–79.
- 13 Zhukeshov A. Plasma diagnostics in a pulsed accelerator used for material processing. // Journal of Physics. Conference series. 63 (2007) 012014
- 14 Zhukeshov A. M., Baimbetov F. B., Amrenova A. U., Gabdullina A. T. Measuring the Parameters of Pulsed Plasma Flows by Means of Magnetic Probes. // Journal of Engineering Thermophysics. - 2007. - Vol. 16. - P. 40–43.
- 15 Uglov V.V., Remnev G.E., Kuleshov A.K., Astashinski V.M., Saltymakov M.S. Formation of hardened layer in WC-TiC-Co alloy by treatment of high intensity pulse ion beam and compression plasma flows. // Surface and Coating Technology, 2010. - V.204. – P. 1952-1956.
- 16 Черенда Н.Н., Углов В.В., Бирик Н.В., Гусакова С.В., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М., Ухов В.А. Модификация структуры и механических свойств быстрорежущей стали P18 при комбинированном плазменном и термическом воздействии. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2011, № 3. - С. 107–112.
- 17 Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А., Тересов А.Д., Москвин П.В., Будовских Е.А., Коваль Н.Н., Бирик Н.В., Черенда Н.Н., Углов В.В. Образование наноструктурных состояний в силумине при высокоинтенсивной электронной обработке. // Наноматериалы и наноструктуры, 2013. - № 1. - Т. 4. - С. 39-42
- 18 Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А., Тересов А.Д., Москвин П.В., Будовских Е.А., Коваль Н.Н., Бирик Н.В., Черенда Н.Н., Углов В.В. Наноструктурирование поверхности силумина эвтектоидного состава электронно-ионно-плазменными методами. //Известия высших учебных заведений. Физика. - Т. 56. №1-2, 2013. - С. 98-102.
- 19 Ivanov Y., Petrikova E., Cherenda N., Teresov A. Hardening of the Surface Layer of Silumin by Electron Beam. //Advanced Materials Research Vol. 872 (2014). – P. 162-166.
- 20 Овчаренко В.Е., Псахье С.Г., Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Способ электронно-пучкового упрочнения твердосплавного инструмента или изделия. Заявка №2007107259, дата подачи заявки: 2007.02.26. RU 2007107259, А, МПК7, C21D9/22, C21D1/09.
- 21 Nazarov D.S., Ozur G.E., and Proskurovsky D.I. // Proc. of 11th IEEE Int. Pulsed Power Conference. – Baltimore. USA. – 1997. – V. II. – P. 1335-1340.
- 22 Engelko V., Mueller G., Bluhm H.// Vacuum. – 2001. –Vol. 62/2-3. – P. 97-103.
- 23 Бугаев С.П., Крейнделъ Ю.Е., Щанин П.М. Электронные пучки большого сечения. – Москва: Энергоатомиздат. – 1984. – 113 с.
- 24 Гаврилов Н.В., Гушенец В.И., Коваль Н.Н., Окс Е.М. и др. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером. – Екатеринбург: УИФ «Наука». – 1993. – 148 с.
- 25 Goebel D.M., Schumacher R.W. // R.M. Watkins Editor. Proc. SPIE. – 2001. – P. 1093-1098.
- 26 Krokhmal A., Gleizer J.Z., Krasik Ya.E. and Felsteiner J.// Journal of applied physics. – 2003. –Vol. 94. – №1. – pp. 44-54. Девятков В.Н., Коваль Н.Н., Щанин П.М. // Изв. вузов. Физика. – 2001. – № 9. – С. 36-43.
- 27 Grigoriev S.V., Koval N.N., Devjatkov V.N., Teresov A.D. // Proc. 9th Intern. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk. – 2008. – P.19-22.