

**Веремейчик А. И., Сазонов М. И., Хвисевич В. М.,
Батрак В. В., Онысько С. Р.**

ПОВЕРХНОСТНОЕ ПЛАЗМЕННОЕ АЗОТИРОВАНИЕ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ

Введение. Азотирование является одним из наиболее распространенных и эффективных методов упрочнения поверхности [1–5]. При таком способе термообработки повышаются прочность, твердость, износостойкость, предел выносливости, устойчивость при сопротивлении знакопеременным нагрузкам, сопротивление коррозии сталей и сплавов. Вследствие возникновения сжимающих остаточных напряжений в упрочненном слое значительно увеличивается предел усталости азотированных сталей. Кроме того, после процесса азотирования отсутствует необходимость в дополнительной термообработке. Согласно [16], существуют несколько методов азотирования (жидкое, газообразное, ионизованный газ), различающихся по агрегатному состоянию азота. В последнее время широкое распространение получили установки для азотирования, работающие на тлеющем разряде [17–21]. Это связано с тем, что процесс ионного азотирования в них оказывается наиболее быстрым и эффективным [17]. Однако установки для газового и плазменного азотирования также используются в производстве. Согласно [13, 22, 23], плазменное азотирование имеет ряд преимуществ по сравнению с газовым, касающихся экономических и экологических аспектов (расход газа, производство оксидов азота и углерода при плазменном азотировании в тысячи раз меньше, чем при газовом и т. д.).

Технология азотирования сталей широко применяется в машиностроении для повышения эксплуатационной надежности деталей и инструмента. Первые сведения об азотировании могут быть отнесены к возведению колонны (415 г. н. эры) в г. Дели (Индия), высокую коррозионную стойкость которой объясняют наличием тонкой поверхностной нитридной пленки [17]. Появление специальных азотируемых сталей определило широкое распространение методов азотирования в промышленности для поверхностного упрочнения деталей машин и инструмента. Широкое распространение получили процессы азотирования в 20-х годах прошлого века. В промышленности азотирование сталей находит самое широкое применение. При этом обработке подвергаются разные типы металлов, включая жаропрочные, коррозионностойкие, тугоплавкие, конструкционные и т. д. Азотированные стали по своим основным характеристикам значительно превосходят закаленные и цементированные стали [13].

В промышленности широко используются установки для измельчения древесных отходов. Производительность и эксплуатационная надежность таких установок во многом определяется техническим состоянием измельчителей, которые подвергаются воздействию агрессивной среды, механическим усилиям и температурным воздействиям. Существуют различные способы повышения эксплуатационных свойств таких деталей [24, 25], среди которых следует отметить ионно-плазменное азотирование в пульсирующем тлеющем разряде [17, 18, 26–28], импульсно-плазменное азотирование [29]. Процессам плазменного азотирования посвящено и ряд зарубежных публикаций [30–35].

Анализ публикаций, посвященных плазменному азотированию показал, что в существующих работах недостаточное внимание уделяется тепловым процессам, происходящим в упрочняемых деталях при воздействии плазменной дуги.

1. Установка для поверхностного плазменного азотирования.

При использовании установок (машин) для дробления древесных отходов мебельного и других производств применяются детали (измельчители) в виде усеченной пирамиды из стали 40X (рисунок 1). Измельчители упрочняют с помощью объемной закалки. В процессе эксплуатации эти детали подвергаются механическому изнашиванию и воздействию динамических нагрузок. В результате происходил не только интенсивный износ их режущей части, но и выламывание кусков металла размерами до 2–3 см (рисунок 1, а). Такой вид разрушения характерен при упрочнении деталей объемной закалкой. Он обусловлен возникновением в металле значительных механических напряжений и охрупчивания стали.

Чтобы исключить возникновение таких дефектов в материале предложено осуществлять упрочнение измельчителей, в частности их режущей кромки, поверхностным плазменным азотированием.

Для осуществления процесса упрочнения сначала осуществлялась объемная закалка, а затем поверхностное плазменное азотирование движущейся дугой заготовок измельчителей при помощи созданной плазменной установки [36].

Эксперименты показали, что перекрытие дорожек зоны теплового воздействия плазменной струи существенно повышает трещиностойкость и ударную вязкость деталей, при этом несколько снижается износостойкость. Снижение износостойкости вызвано не наличием зоны отпуска, которое здесь имеет место, а снижением микротвердости упрочненной поверхности из-за повторного нагрева детали. Повышение трещиностойкости можно объяснить только повышенной пластичностью сталей со структурой отпуска. Образованная в этой зоне троосто-сорбитная структура вследствие воздействия плазменной струи характеризуется высокой степенью дисперсности. Такой вариант плазменного поверхностного азотирования играет более значительную роль в случае воздействия динамических нагрузок на деталь, чем вариант без перекрытия.

Схема плазматрона приведена на рисунке 2. Основными деталями плазматрона являются катод 1, сопло 2, дополнительное сопло 4, кольцо закрутки защитного газа аргона 3, кольцо подачи рабочего газа азота 5, тогда как анодом дуги служит закаливаемая деталь 6.

В качестве катода 1 использован вольфрамовый стержень диаметром 1,2 мм. Катод защищается и охлаждается потоком аргона. Сопло 2 служит для формирования так называемой обжатой плазменной дуги. Локальность нагрева и высокая плотность теплового потока в анодном пятне достигается за счет интенсивного охлаждения водой медного сопла, причем внутренний диаметр сопла равен 0,8–1,9 мм.

Веремейчик Андрей Иванович, к. физ.-мат. н., доцент; e-mail: vai_mrtm@tut.by.

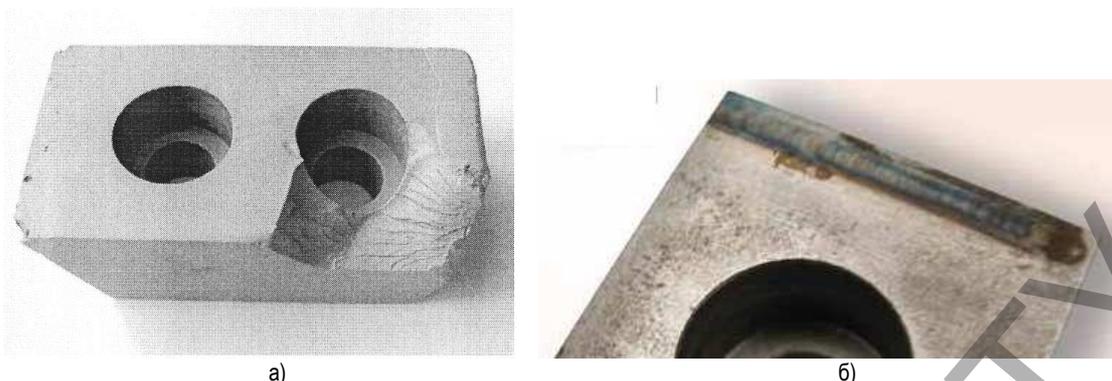
Сазонов Михаил Иванович, д. т. н., профессор, профессор кафедры прикладной механики Брестского государственного технического университета; e-mail: vai_mrtm@bstu.by.

Хвисевич Виталий Михайлович, к. т. н., доцент, профессор кафедры прикладной механики Брестского государственного технического университета.

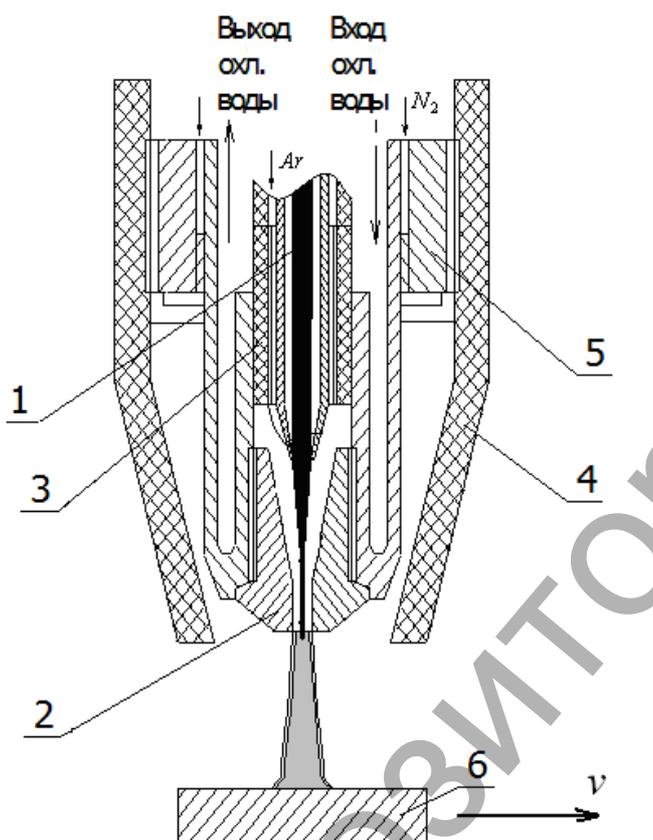
Онысько Сергей Романович, ст. преподаватель кафедры прикладной механики Брестского государственного технического университета.

Батрак Валентин Васильевич, ст. преподаватель кафедры прикладной механики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.



а) после эксплуатации при упрочнении объемной закалкой; б) измельчитель после поверхностного плазменного азотирования
Рисунок 1 – Измельчители древесного сырья



1 – вольфрамовый катод, 2 – медное сопло, 3 – деталь подачи защитного газа аргона, 4 – дополнительное сопло, 5 – кольцо закрутки рабочего газа азота, 6 – анод-упрочняемая деталь
Рисунок 2 – Схема плазмотрона

Плазменное азотирование упрочняемой детали обеспечивается постановкой в плазмотроне дополнительного керамического сопла 4 с внутренним диаметром 18 мм, а между соплами 2 и 4 подается рабочий газ азот с расходом 1,2–4,0 л/мин. Кроме того, за счет высокой скорости течения плазмы в дуге происходит эжекция азота в зону анодного пятна, что приводит к плазменному азотированию поверхностного слоя детали и подтверждается исследованиями свойств этого слоя.

После поджига дежурной дуги по ее проводящему каналу загорается основная дуга между катодом и деталью-анодом. Перед включением плазмотрона в зону катода для его защиты подается аргон с расходом 1,2–4,1 л/мин, а расход азота составляет 0,8–2,4 л/мин. При закалке использовались аргон и азот высокой чистоты из баллонов при давлении газов $150 \cdot 10^5$ Па.

Проведенные эксперименты показали, что подача азота позво-

ляет увеличить напряжение дуги и соответственно мощность плазмотрона почти в 2 раза и достичь плотности теплового потока в анодном пятне вплоть до $6 \cdot 10^7$ Вт/м² при диаметре пятна 1,9 мм.

2 Режимы азотирования. Плазменное азотирование производилось при токах дуги $I = 6–32$ А. Скорость перемещения плазмотрона варьировалась от 4 до 27 мм/с. В результате проведенных экспериментов и статической обработки их результатов были определены оптимальные параметры процесса поверхностного упрочнения: скорость перемещения плазмотрона $V = 9–13$ мм/с, ток дуги $I = 22$ А, расход рабочего газа $Q_{N_2} = 3,1$ л/мин.

Типичное распределение микротвердости поверхностного слоя около режущей кромки образца по ширине «дорожки» приведено на рисунке 3.

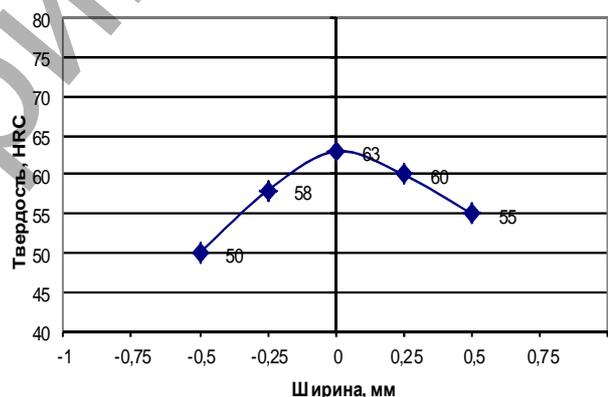


Рисунок 3 – Твердость по ширине дорожки около кромки измельчителя
 $I = 7$ А, $V = 9$ мм/с

Кроме того, были проведены измерения твердости по длине дорожки при движении дуги по режущей кромке образца. График изменения микротвердости по длине дорожки приведен на рисунке 4.

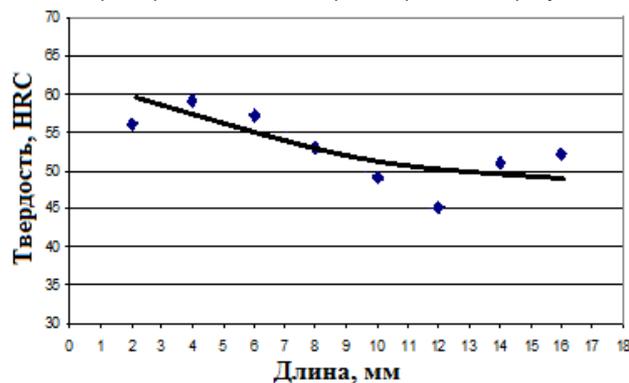


Рисунок 4 – Изменение твердости по длине дорожки
 $I = 7$ А, $V = 13$ мм/с

Предварительные исследования показали, что изменение расхода азота в пределах $Q = 1,8\text{--}3,6$ л/мин незначительно влияет на величину микротвердости и глубину упрочнения, а при $Q = 1,2$ л/мин наблюдается резкое уменьшение области упрочнения.

Анализ результатов исследований показывает, что характер распределения микротвердости в этом случае подобен распределению микротвердости по глубине поверхностного слоя в двух рассмотренных выше случаях. Глубина упрочненного слоя достигает 0,55 мм, и ее значения почти в 2 раза выше значений микротвердости материала в исходном состоянии.

Следует заметить, что значительное увеличение твердости материала является результатом объемного влияния образующих фаз и главной фазы Fe_3N при незначительном влиянии других фаз, а также образованием в поверхностном слое азотистого мартенсита.

Проведены исследования фазового состава упрочненного слоя стали методом дифракции рентгеновских лучей. Сравнение фазового состава поверхностного слоя образцов, обработанных плазменной струей в защитных средах азота и аргона, показали значительное отличие.

Результаты фазового состава стали подтверждают причины роста микротвердости по глубине поверхностного слоя (рис. 5).

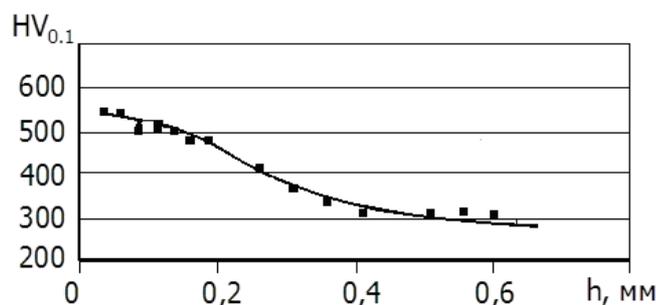


Рисунок 5 – Характер распределения микротвердости упрочненного слоя по глубине при скорости движения дуги $v = 17$ мм/с

Проведенные эксперименты показали, что подача азота позволяет увеличить напряжение дуги и, соответственно, мощность плазматрона почти в 2 раза и достичь плотности теплового потока в анодном пятне вплоть до $6 \cdot 10^7$ Вт/м² при диаметре пятна 2,0–2,4 мм.

На рисунке 6 приведена типичная микроструктура стали 40X при токе дуги 15 А.

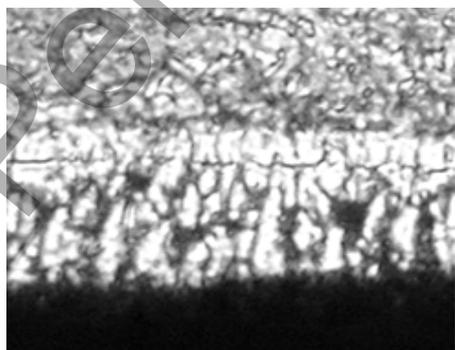
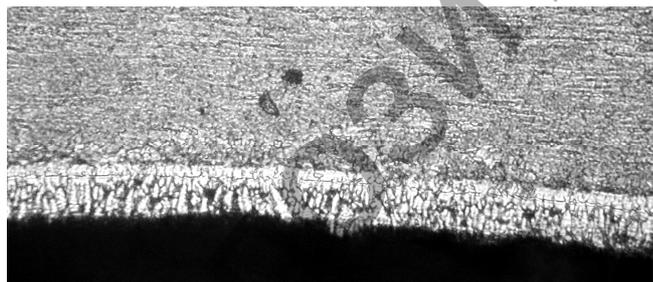


Рисунок 6 – Микроструктура стали при токе дуги $I = 15$ А, $Q_{N_2} = 3,6$ л/мин

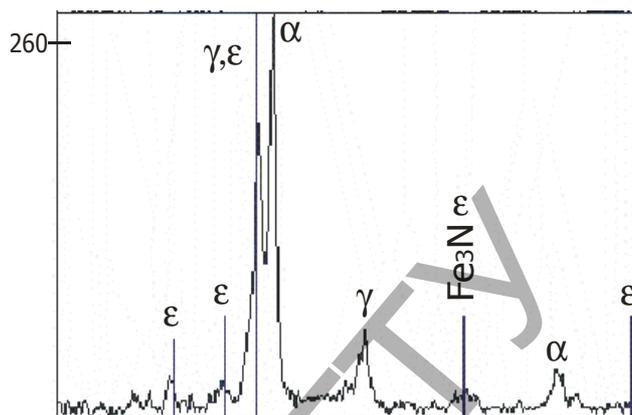


Рисунок 7 – Типичная дифрактограмма фазового анализа плазменной дорожки

Анализ результатов рентгено-структурных исследований установил, что при воздействии плазменной струи в среде азота в фазовом составе стали образовался нитрид железа Fe_3N – гексагональная фаза типа ϵ , что объясняется диффузионным насыщением азотом исходного материала, т. е. между атомарным азотом плазменной струи и атомами исходного материала происходит химическая реакция, результатом которой является нитрид железа.

Таким образом, процесс поверхностного плазменного азотирования может существенно увеличить эксплуатационные свойства штамповой оснастки, металлообрабатывающего инструмента, других металлоизделий.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тюрин, Ю. Н. Плазменные упрочняющие технологии. – К.: Наукова думка, 2008. – 215 с.
2. Саблев, Л. П. Плазменное азотирование режущего инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 / Л. П. Саблев, А. А. Андреев, В. М. Шулаев // Сборник докладов Международной конференции «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов». – Харьков. – ННЦ ХФТИ. – 2002. – С. 133–137.
3. Плазменное поверхностное упрочнение / Л. К. Легцинский [и др.]. – Киев: Техника, 1990. – 109 с.
4. Спиридонов, Н. В. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н. В. Спиридонов, О. С. Кобяков, И. Л. Курпиров – Минск: Высшая школа, 1988. – 155 с.
5. Davis, J. R. Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics // ASM International, Materials Park, Ohio, 2002. – 319 p.
6. Веремейчик, А. И. Плазменные технологии как одни из основных технологий повышения эксплуатационных свойств металлоизделий / А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки. – Гомель, 2008. – Вып. 2. – С. 6–12.
7. Легцинский, Л.К. Плазменное поверхностное упрочнение / Л. К. Легцинский, С. С. Сомотугин, И. И. Пирч, В. И. Комар – Киев: Техника, 1990. – 107 с.
8. Сафонов, Е. Н. Плазменная закалка деталей машин: монография / М-во образования и науки РФ, ФГАОУ ВПО «УрФУ», Улан. им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2014. – 116 с.
9. Поверхностное упрочнение инструментальных сталей и сплавов при нагреве высококонцентрированной плазменной струей / С. С. Сомотугин [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 3. – С. 23–28.
10. Балановский, А. Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов. – Иркутск: ИрГТУ, 2006. – 180 с.
11. Кундас, С. П. Компьютерное моделирование процессов термической обработки сталей: монография. – Минск: Бестпринт, 2005. – 313 с.

12. Чигарев, А. В. ANSYS для инженеров / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк – М.: Машиностроение. – 2004. – 510 с.
13. Лахтин, Ю. М. Азотирование стали / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган – М.: Машиностроение, 1976. – 255 с.
14. Афонский, И. Ф. Теория и практика азотирования стали / И. Ф. Афонский, А. В. Смирнов, О. И. Вер – Л.: Госмашметиздат, 1933. – 160 с.
15. Балашов, Б. Ф. Азотирование как метод повышения прочности деталей машин // Повышение усталостной прочности деталей машин поверхностной обработкой. – М.: Машгиз, 1952. – С. 64–82.
16. Гура, П. С. Ионно-плазменное азотирование поверхности сталей в индукционном разряде с плоской катушкой / П. С. Гура, В. И. Сысун // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9. – № 6–1. – С. 82–85.
17. Токарев, А. В. Ионное азотирование стали в импульсном тлеющем разряде // Вестник КРСУ. – 2009. – Т. 9. – № 11. – С. 51–57.
18. Особенности азотирования стали 30ХГСА в пульсирующем тлеющем разряде / Б. А. Ляшенко [и др.] // Вісник Черкаського національного університету. – 2007. – Випуск 117. – Серія "Фізико-математичні науки". – С. 107.
19. Андреев, А. А. Азотирование сталей в газовом дуговом разряде низкого давления / А. А. Андреев, В. М. Шулаев, Л. П. Саблев // ФІП ФІП PSE. – 2006. – Т. 4, № 3–4. – С. 191–197.
20. Азотирование стали в плазме модифицированного вакуумно-дугового разряда / А. А. Андреев [и др.] // Технология машиностроения. – 2002. – № 5. – С. 27–30.
21. L.N. Tang, M.F. Yan Email Influence of Plasma Nitriding on the Microstructure, Wear, and Corrosion Properties of Quenched 30CrMnSiA Steel // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2013. – V. 22, № 7. – P. 2121–2129.
22. Plasma Nitriding - especially in the Gear Industry / Andreas Gebeshuber Ralph Trigueros Rübigen GmbH & Co KG – Austria (<http://www.industrialheating.com.br/wp-content/uploads/artigos/SIR.pdf>).
23. S.S. Akhtar, A.F.M. Arif, and B.S. Yilbas. Influence of Multiple Nitriding on the Case Hardening of H13 Tool Steel: Experimental and Numerical Investigation, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2011. – № 58. – P. 57–70.
24. Пахарев, А. В. Повышение показателей надежности ножей кулеров путем совершенствования технологии изготовления и восстановления: диссертация ... кандидата технических наук : 05.20.03. – Саратов, 2002. – 170 с.
25. Чижилова, Т. В. Перспективы повышения эксплуатационной надежности режущих инструментов в мясной промышленности / Т. В. Чижилова, Г. А. Мартынов – М.: АгроНИИТЭИММП, 1987. – 43 с.
26. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді: пат. 10014 Україна, МПК 7 C23C 8/06 / Б. А. Ляшенко, А. В. Рутковский, В. І. Мирненко, О. В. Радько; Національна академія оборони України. – № 19782; Заявл. 19.09.06; Опубл. 15.12.06, Бюл. №12 – 5 с.
27. Лахтин, Ю. М. Физические процессы при ионном азотировании / Ю. М. Лахтин, Ю. Н. Крымский // Защитные покрытия на металлах. – Киев, 1968. – Вып. 2. – С. 225–229.
28. Бутенко, О.И. Формирование диффузионного слоя при ионном азотировании / О. И. Бутенко, Я. М. Головчинер, С. А. Скотников // Прогрессивные методы термической и химико-термической обработки. – М.: Машиностроение, 1972. – С. 122–128.
29. Некоз, О. И. Импульсно-плазмовое упрочнение ножей мясорезущих машин / О. И. Некоз, О. В. Колисниченко, Z. Zdislav Kondrat, A. В. Батраченко // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друку», 2010. – Вип. 54. – С. 172–180.
30. Lapanche, H. Nituration allassigul et ionitration // Metallurgie et la construction mecanique. –1963. – № 10. – P. 849-855. – № 11. – P. 837-953.
31. Y. Sun, X.Y. Li, and T. Bell. X-ray Diffraction Characterisation of Low Temperature Plasma Nitrided Austenitic Stainless Steels, J. Mater. Sci., 1999, 34. – P. 4793–4802.
32. Brinke, T. Plasma-Assisted Surface Treatment. Nitriding, nitrocarburizing and oxidation of steel, cast iron and sintered materials / T. Brinke, J. Crummenauer, R. Hans, W. Ooppel // Sellier Druck GmbH, D-85354 Freising, 2006. – 71 p.
33. Zagonel, L. F. Alvarez. Influence of the Process Temperature on the Steel Microstructure and Hardening in Pulsed Plasma Nitriding / L. F. Zagonel, C. A. Figueroa, R. Droppa, Jr., F. Alvarez // Surf. Coat. Technol. – 2006. – № 201. – P. 452–457.
34. Kanetake, N. Application technology of plasma nitriding. // Int. semin. Plasma Heat Treat. Set. and Technol. Senlis. Paris, 1987. – P. 145–153.
- A. Basu, J. Dutta Majumdar, J. Alphonsa, S. Mukherjee, and I. Manna. Corrosion Resistance Improvement of High Carbon Low Alloy Steel by Plasma Nitriding, Mater. Lett., 2008, 62. – P. 3117–3120.
35. Сазонов, М. И. Теоретические и экспериментальные исследования процесса поверхностного плазменного упрочнения режущего инструмента / М. И. Сазонов, В. М. Хвиевич, А. И. Веремейчик, В. В. Гарбачевский // Вестник Брест. гос. техн. ун-та. – 2012. – № 4 : Машиностроение. – С. 28–31.

Матеріал поступив в редакцію 20.11.2018

VEREMEYCHIK A. I., SAZONOV M.I., HVISEVICH V. M., BTRAK V. V., ONYSKO S. R. Superficial plasma nitriding of grinders of wood waste

This article is devoted to studying of operability of installation for crushing of wood waste and development of the corresponding methods of increase in its reliability and durability. It is established that the resource of continuous work of installation is limited by service life of grinders. It is offered to apply superficial plasma nitriding by means of the compressed moving plasma arch to their hardening. Application of such high-concentrated source of heating allows to carry out superficial hardening of a product, and only its worn-out sites, excepting preliminary volume training of its core and keeping thereby plastic properties of material. Such way of heat treatment allows to increase resistance to wear and fatigue; to provide the high hardness and wear resistance of a surface; to reduce deformations of the strengthened details thanks to locality and short duration of interaction of plasma with the surface of metal. The plasmatron and plasma installation is created, superficial plasma nitriding of the grinders strengthened by volume training is carried out.

УДК 621.833:517.443

Омель Д. В., Драган А. В.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЗАЦЕПЛЕНИИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Введение. Зубчатые передачи в процессе работы возбуждают вибрацию. Основным источником вибрации являются динамические процессы, происходящие в зоне зацепления. Интенсивность вибрации зависит от состояния рабочих поверхностей зубьев, а также

Омель Дмитрий Владимирович, магистр технических наук, старший преподаватель кафедры начертательной геометрии и инженерной графики Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.