



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 3, 2018

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2018.3.01

УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НОЖЕЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЕННОЙ ДУГИ

А.И. Веремейчик, М.И. Сазонов, В.М. Хвисевич

Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь

О СТАТЬЕ

Получена: 03 июля 2018 г.
Принята: 17 сентября 2018 г.
Опубликована: 08 октября 2018 г.

Ключевые слова:

плазматрон, нож, температурное поле, термонапряжения, перемещения, плазменное азотирование, износостойкость, движущийся источник тепла.

АННОТАЦИЯ

Изучена работоспособность установки для измельчения пищевых продуктов, разработаны соответствующие методы увеличения ее надежности и долговечности. Установлено, что ресурс непрерывной работы установки лимитируется сроком службы ножей. Для упрочнения ножей предлагается применить поверхностное плазменное азотирование при помощи сжатой движущейся плазменной дуги. Применение такого высококонцентрированного источника нагрева позволяет осуществлять поверхностное упрочнение изделия, причем только его изнашиваемых участков, включая предварительную объемную закалку его сердцевины и сохраняя тем самым пластичные свойства материала. Такой способ термообработки позволяет повысить сопротивление износу и усталости; обеспечить высокую твердость и износостойкость поверхности; уменьшить деформации упрочняемых деталей благодаря локальности и кратковременности взаимодействия плазмы с поверхностью металла. По результатам предварительных экспериментальных исследований по известной температуре поверхности, близкой к температуре плавления стали, установлен закон распределения температуры. На основе гауссового закона распределения температуры в конечно-элементном вычислительном комплексе ANSYS разработана теоретическая модель для изучения распределения температурного поля в ноже по глубине при различных скоростях движения источника нагрева, токах дуги, чтобы обеспечить оптимальные параметры процесса термообработки при заданной глубине закалки, твердости и т.д. Далее на основании этих данных проводится теоретический эксперимент по исследованию напряженно-деформированного состояния ножа при воздействии на него движущегося источника нагрева, моделирующего плазменную струю. Механико-математическая модель, разработанная с помощью ANSYS, учитывает изменение температуры по диаметру движущегося пятна нагрева и зависимость физико-механических характеристик материала ножа от температуры. Создан плазматрон и плазменная установка, проведено поверхностное плазменное азотирование упрочненных предварительной объемной закалкой ножей. Исследована износостойкость ножей после объемной закалки и поверхностного плазменного азотирования. Результаты исследований позволили повысить износостойкость ножей, упрочненных путем предварительной объемной закалки и поверхностного плазменного азотирования, более чем в два раза по сравнению с объемной закалкой.

© ПНИПУ

© Веремейчик Андрей Иванович – к.ф.-м.н., доц., e-mail: vai_mrtm@tut.by, ORCID: 0000-0003-0373-482X.

Сазонов Михаил Иванович – д.т.н., проф., e-mail: vai_mrtm@bstu.by, ORCID: 0000-0001-9000-7115.

Хвисевич Виталий Михайлович – к.т.н., доц., e-mail: vmhvisevitch@bstu.by, ORCID: 0000-0002-1787-2345.

Andrei I. Veremeichik – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: vai_mrtm@tut.by, ORCID: 0000-0003-0373-482X.

Mikhail I. Sazonov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: vai_mrtm@bstu.by, ORCID: 0000-0001-9000-7115.

Vitaly M. Hvisevitch – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: vmhvisevitch@bstu.by, ORCID: 0000-0002-1787-2345.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

MODELLING THE STRESS-STRAIN STATE OF BLADES AFFECTED BY PLASMA ARC FOR THE FOOD GRINDING PLANT

A.I. Veremeichik, M.I. Sazonov, V.M. Hvisevich

Brest State Technical University, Brest, Belarus

ARTICLE INFO

Received: 03 July 2018
Accepted: 17 September 2018
Published: 08 October 2018

Keywords:

plasmatron, knife, temperature field, thermal stresses, displacements, plasma nitriding, wear resistance, moving heat source.

ABSTRACT

This article considers the efficiency of the food grinding plant and appropriate methods aimed at increasing its reliability and durability. It is established that a plant's service life is limited by the service life of its knives. It is proposed to apply surface plasma nitriding with a compressed moving plasma arc to strengthen the knives. The use of such a highly concentrated heating source allows for surface hardening of a product, though only of its wear parts, including preliminary bulk hardening of its core and thereby maintaining materials' plastic properties. This method of heat treatment allows to increase the resistance to wear and fatigue; to provide hardness and wear resistance of the surface; to reduce the deformation of the hardened parts due to the locality and short-term interaction of plasma with the metal surface. According to the results of the preliminary experimental studies on surface temperatures close to the melting temperature of steel, the temperature distribution law is established. Based on the Gaussian law of temperature distribution in the finite element computing system ANSYS, a theoretical model is developed to study the distribution of the temperature field in the knife in depth at different speeds of the heating source and currents in order to provide optimal parameters of the heat treatment process at a given depth of tempering, hardness, etc. Further, on the basis of these data, a theoretical experiment is conducted to study the stress-strain state of the knife under the influence of a moving heating source modelling the plasma jet. The mechanical and mathematical model developed by ANSYS takes into account the temperature change in the diameter of the moving heating spot and the dependence of the physical and mechanical characteristics of the knife's material on temperature. A plasma torch and plasma system are developed, and surface plasma nitriding of knives subject to preliminary bulk hardening is performed. The wear resistance of the blades after an extensive surface hardening and plasma nitriding is investigated. The results of the research allowed to increase the wear resistance of knives subject to preliminary bulk hardening and surface plasma nitriding by more than 2 times compared to bulk hardening.

© PNRPU

Введение

В настоящее время перед промышленностью остро стоит проблема выпуска качественной и конкурентоспособной продукции. Требования качества и долговечности относятся и к процессам термообработки деталей. Важным этапом в процессе термообработки является определение оптимальных режимов этого процесса. Экспериментальные методы определения оптимальных режимов термообработки требуют значительных материальных ресурсов. Одним из эффективных направлений анализа обоснованности назначения режимов термообработки изделий является применение систем автоматизированного проектирования, которые при небольшом количестве экспериментальных исследований позволяют получить максимальное количество информации о свойствах проектируемого процесса термообработки [1–10]. Широкое распространение для моделирования теплофизических процессов получили в последнее время универсальные программные комплексы Nastran, ANSYS и др. [11]. В данной работе рассматривается математическое моделирование процесса поверхностного плазменного азотирования с использованием конечно-элементного пакета ANSYS [12].

Азотирование является одним из наиболее распространенных и эффективных методов упрочнения поверхности [13–15]. При таком способе термообработки по-

вышаются прочность, твёрдость, 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 исчезает необходимость в дополнительной термообработке. Согласно [16], существует 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. э.) 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, коррозионно-стойкие, тугоплавкие, конструкционные и т.д. Азотированные стали по своим основным характеристикам значительно превосходят закаленные и цементированные стали [13].

В пищевой промышленности широко используются установки для измельчения пищевых продуктов. Производительность и эксплуатационная надежность таких установок во многом определяется техническим состоянием измельчителей (ножей), которые подвергаются воздействию агрессивной среды, механическим усилиям (центробежные силы, силы трения и т.д.), температурным воздействиям и вращаются с высокими угловыми скоростями. 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 посвящен и ряд зарубежных публикаций [30–35].

Важнейшей характеристикой процесса плазменной термообработки является температурное поле, теоретическим и экспериментальным методам исследований которого посвящены некоторые публикации отечественных и зарубежных авторов [4, 10, 11, 33, 36–38]. К примеру, в монографии А.Е. Балановского [10] обобщены теплофизические принципы плазменного поверхностного упрочнения металлов высококонцентрированной плазменной струей. В статье Н.Н. Рыкалина, А.В. Николаева, И.Д. Кулагина [36] установлено распределение удельного теплового потока по пятну нагрева поверхности изделия плазменной струей при доабляционном режиме. Вопросам влияния температуры процесса на микроструктуру и упрочнение стали при импульсном плазменном азотировании посвящена работа [33].

Анализ публикаций, посвященных плазменному азотированию, показал, что в существующих работах недостаточное внимание уделяется тепловым процессам, происходящим в упрочняемых деталях при воздействии плазменной дуги. Настоящая работа в основной своей части посвящена исследованию температурных полей и термонапряжений, возникающих в ножах, подвергнутых поверхностному плазменному азотированию движущимся источником нагрева, а также определению оптимальных режимов плазменного азотирования. Разработана механико-математическая модель ножа и исследован износ его элементов. Изучены температурные

поля движущегося высокоинтенсивного источника нагрева. Предложен процесс поверхностного плазменного азотирования, создана плазменная установка, определены оптимальные параметры процесса упрочнения. Срок эксплуатации измельчителей пищевых продуктов (ножей) увеличен в 2,3 раза.

1. Объект и методика исследований

Согласно [39], в перерабатывающих отраслях промышленности массовое применение получили установки для переработки и измельчения продуктов питания. Все типы режущих рабочих органов (ножи, ножевые решетки и пр.) наряду с высокой стоимостью обладают и низкими показателями надежности, связанными прежде всего с их конструктивно-технологическим несовершенством. Существующие технологии упрочнения режущего инструмента перерабатывающих отраслей несовершенны с позиции ресурсосбережения, а изделия не удовлетворяют современным требованиям. Исходя из этого актуальной научно-технической проблемой является комплексное повышение показателей надежности инструмента за счет разработки ресурсосберегающих технологий упрочнения.

Ножи-измельчители установки для измельчения продуктов, изготовленные из хромистой жаропрочной нержавеющей стали 14X17H2 (ГОСТ 5632–2014), упрочнялись объемной закалкой, в результате твердость детали достигала 42–48 HRC. Химический состав сплава 14X17H2 приведен в табл. 1. Нож толщиной 8 мм имеет плоскую серповидную форму (рис. 1).

Таблица 1

Химический состав стали 14X17H2

Table 1

Chemical composition of 14X17H2 steel

C	Cr	Mn	Ni	P	S	Si
0,11–0,17	16,0–18,0	≤ 0,80	1,5–2,5	≤ 0,030	≤ 0,025	≤ 0,80

В установке одновременно используются два ножа, установленные в горизонтальном положении на вращающемся валу емкости, в которую загружается сырье для измельчения общей массой 70 кг. Кромка детали, заточенная под углом 21°, обращена вниз. В емкость подается пар с температурой 150 °С, после размельчения и расплавления сырья часть его остается под поверхностью детали. Ведущий вал вращается с высокой скоростью, совершая 740–1480 об/мин. Один цикл нагружения при стационарном режиме составляет 7 мин; а с учетом времени перезагрузки установки за сутки деталь нагружается до 40 раз.

В процессе эксплуатации ножи подвергались кавитационному и коррозионно-механическому изнашиванию и имели короткий срок использования. Их долговечность не превышала трех месяцев, поэтому разрушение материала является малоцикловым, что свидетельствует о наличии высокоинтенсивных нагрузок. Визуальные

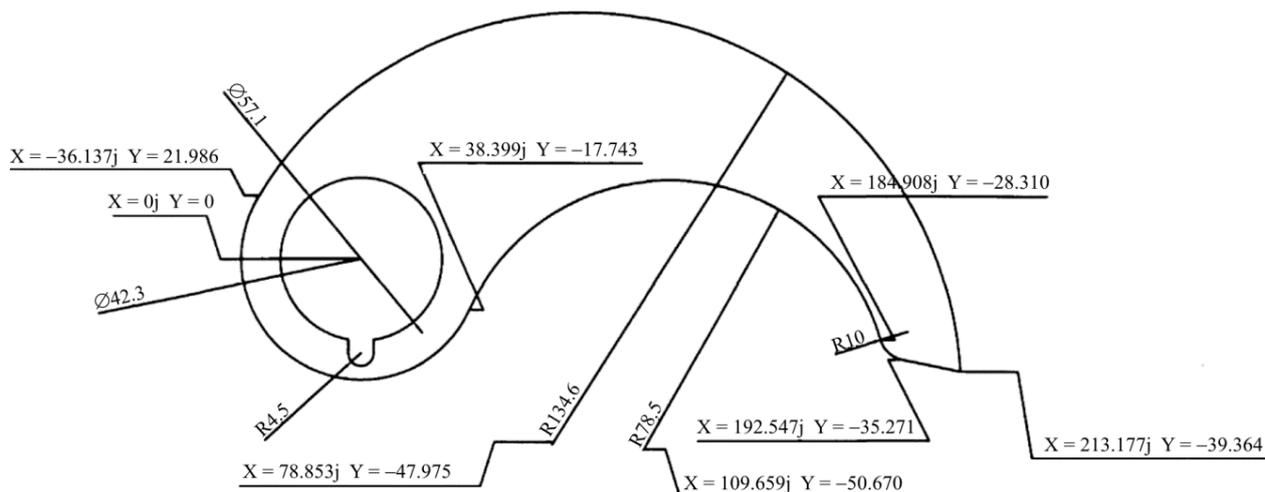


Рис. 1. Эскиз детали с координатами характерных точек (мм)
 Fig. 1. A scheme of the part with the coordinates of the characteristic points (mm)

обследования показали ряд типичных дефектов – поверхностная коррозия металла, нарушение формы режущей кромки путём её смятия, растрескивание и выламывание режущей кромки, разрушение полотна детали, отламывание кусков в периферийной зоне, образование «шейки» *A* в зоне крепления ножа (рис. 2). По результатам экспериментов установлено, что из-за высоких градиентов напряжений в процессе эксплуатации ножей появляются трещины глубиной до 3,7 мм.



Рис. 2. Вид ножа, упрочненного объемной закалкой, после эксплуатации
 Fig. 2. The knife subject to bulk hardening after operations

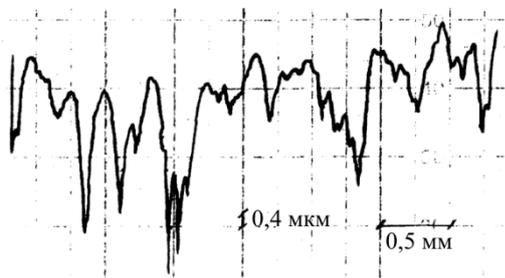


Рис. 3. Типичная профилограмма характера износа ножа
 Fig. 3. Typical profilogram of the knife's wear

С помощью лазерного профилометра для изучения характера износа построены профилограммы ножа на различных расстояниях от оси вращения. Типичная профилограмма характера износа ножей по истечении трех месяцев работы представлена на рис. 3.

Анализ профилограмм показал, что произошел значительный износ материала (до 5 % общей массы ножа). В соответствии с принятой терминологией тип коррозии – точечно-язвенная с проявлением коррозионного растрескивания и кавитационного износа. Толщина ножа в сечениях, наиболее удаленных от оси вращения, уменьшилась из-за большей окружной скорости в этих сечениях ножа примерно в два раза, при этом его поверхность не подверглась деформации и осталась плоской.

Для повышения надежности и долговечности ножей предложено воспользоваться двумя способами:

- анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) при термообработке ножей с разработкой рекомендаций по оптимизации геометрии детали;
- использование поверхностного плазменного азотирования (ППА) при помощи высокоинтенсивных источников нагрева для создания поверхностного слоя ножей с высокой твердостью и износостойкостью.

В качестве основных преимуществ поверхностного плазменного азотирования по сравнению с другими видами термической обработки следует отметить: локальность нагрева, при котором упрочняется только поверхностный слой, а сердцевина детали остается вязкой, что обуславливает повышенное сопротивление износу и усталости; высокую твердость и износостойкость поверхности; небольшие деформации упрочняемых деталей благодаря локальности и кратковременности взаимодействия плазмы с поверхностью металла, что позволяет повысить точность их изготовления, снизить трудоемкость механической обработки и затраты на изготовление деталей [3, 4, 6, 7].

2. Моделирование температурных полей и напряженно-деформированного состояния

Для определения оптимальных режимов процесса поверхностного плазменного азотирования проведены теоретические исследования температурных полей, напряжений и деформаций в ноже, выполненные с применением

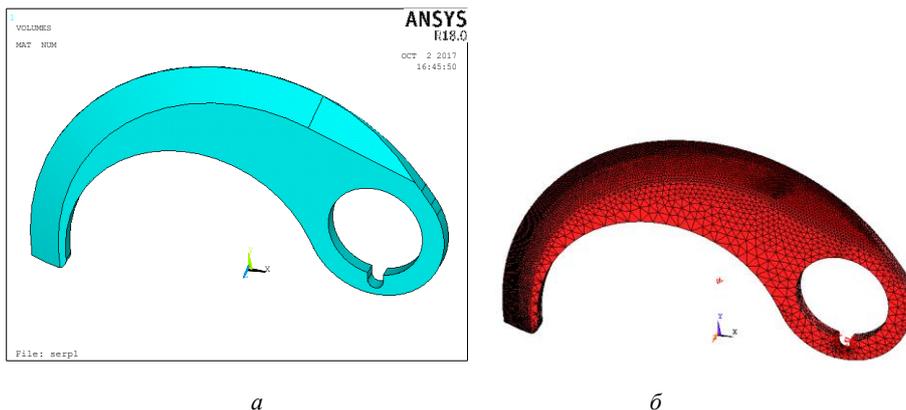


Рис. 4. Конечно-элементная 3D-модель ножа (а) и схема ее разбиения конечными элементами с указанием граничных условий (б)
 Fig. 4. Finite element 3D-model of the knife (a) and the finite elements scheme with boundary conditions (b)

конечно-элементного вычислительного комплекса ANSYS. Известно [11], что температурное поле является основной физической характеристикой поверхностного упрочнения высококонцентрированными источниками нагрева. По данной характеристике возможно определить температуру материала в любой точке зоны термического воздействия (ЗТВ) в разные периоды времени, скорость нагрева и охлаждения, длительность пребывания разогретого металла в ЗТВ в заданном интервале температур в зависимости от параметров режима термообработки и теплофизических характеристик обрабатываемого материала.

В ходе вычислительного эксперимента разработана 3D-модель ножа (рис. 4).

Кроме того, с помощью программного обеспечения измерительного комплекса с лазерным сканированием Mistral 070705 фирмы BROWN&SHARPE с программным обеспечением PC-DMIS PRO Software, позволяющего производить контроль в 3D с предоставлением протоколов контроля (точность измерения 0,003 мм), создана трехмерная модель детали (рис. 5).

При решении температурной задачи в ANSYS использовался термический конечный элемент SOLID70 (Brick 8node), который имеет одну степень свободы (температура в каждом узле), при исследовании НДС – восьмиузловой конечный элемент SOLID185 (Brick 8node) [12]. Модель разбивалась на 53572 конечных элемента. В соответствии со скоростью движения плазменной струи к узлам дискретной модели последовательно прикладывалась температурная нагрузка в виде конвекции. Во избежание оплавления максимальная температура на поверхности ножа должна быть на 3–5 % меньше температуры плавления стали. Конвекция задавалась на всех поверхностях модели, так как температура плазменной струи в центре составляет около 6000 °С. Согласно [10], тепловой поток плазменной струи распределяется по ширине пятна нагрева по закону, близкому к кривой вероятности Гаусса. Исходя из этого на нагреваемой поверхности коэффициент кон-

векции задавался различными по ширине пятнами нагрева в соответствии с законом нормального распределения. На рис. 6 приведено распределение температуры по пятну нагрева, соответствующее нормальному распределению.

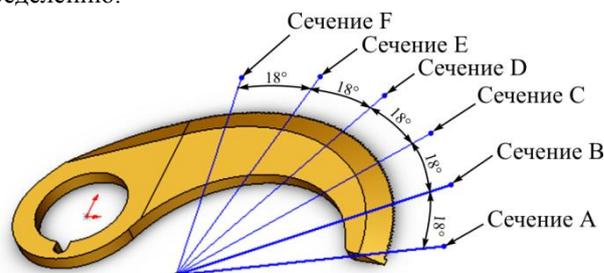


Рис. 5. Расположение сечений на рабочей зоне ножа
 Fig. 5. The location of cross sections on the working area of the knife

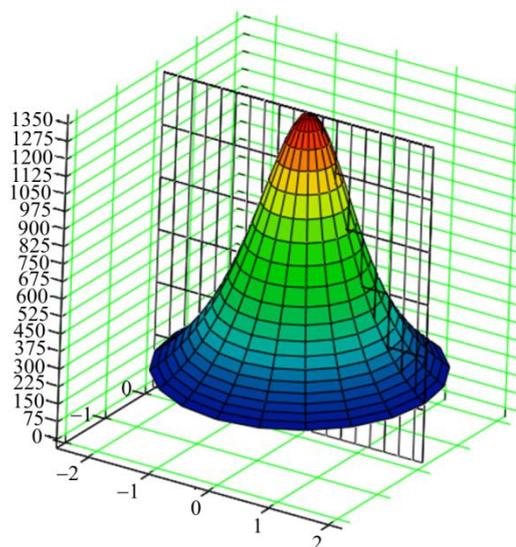


Рис. 6. Распределение температуры в зоне нагрева
 Fig. 6. Temperature distribution in the heating spot

Зависимости температуры и коэффициента конвекции от координат и времени задавались в следующем виде:

$$T(x, y, v) = T_0 / 10^{-3} \left[\left(R \cos \left(\frac{v}{R} t - 0,122 \right) + x \right)^2 + \left(R \sin \left(\frac{v}{R} t - 0,122 \right) - y \right)^2 \right] + 1 + T_H,$$

$$k(x, y, t) = k_0 / 10^{-3} \left[\left(R \cos \left(\frac{v}{R} t - 0,122 \right) + x \right)^2 + \left(R \sin \left(\frac{v}{R} t - 0,122 \right) - y \right)^2 \right] + 1,$$

где $R = 0,13$ м – радиус кривизны траектории движения плазменной струи, определяемый из геометрии режу-

щей кромки ножа; v – скорость движения источника нагрева; $T_H = 20$ °С – температура окружающей среды; $k_0 = 7000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°С}}$ – коэффициент конвекции в центре плазменной струи.

Время движения дуги определялось в зависимости от длины режущей кромки при скорости движения плазматрона $v = 10$ мм/с. Плотность стали 14X17H2 ρ принималась равной $7750 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ [40]. Зависимости физических параметров от температуры приведены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость характеристик стали 14X17H2 от температуры

Table 2

The dependence of the 14X17H2 steel characteristics on temperature

Характеристики стали	$T, \text{°C}$												
	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1300
$E, \text{ГПа}$	220	210	205	190	180	155	120	85	50	20	10	10	10
$v, \text{мм/с}$	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}$	462	486	498	511	519	528	552	584	602	599	595	590	585
$\alpha, 10^{-6} \frac{1}{\text{°C}}$	9,8	9,8	10,6	10,8	11	11,1	11,3	11	10,7	11,4	11,5	11,5	11,5
$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}$	21	22	23	24	24	25	26	27	28	30	30	30	30

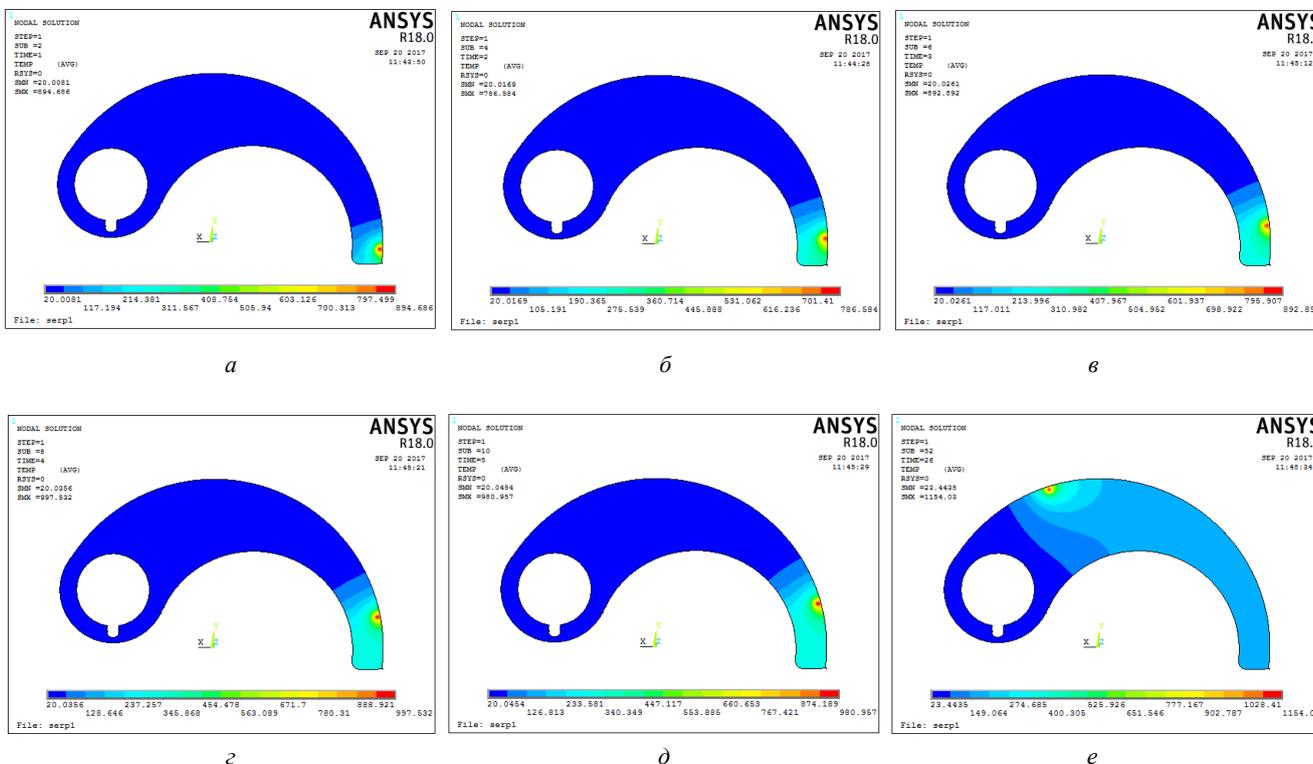


Рис. 7. Распределение температурного поля на поверхности ножа для различных моментов времени:

$a - t = 1$ с; $b - t = 2$ с; $c - t = 3$ с; $d - t = 4$ с; $e - t = 5$ с; $f - t = 26$ с

Fig. 7. The distribution of temperature fields on the surface of the knife for different moments of time:

$a - t = 1$ s; $b - t = 2$ s; $c - t = 3$ s; $d - t = 4$ s; $e - t = 5$ s; $f - t = 26$ s

Основой термического анализа в ANSYS является уравнение теплового баланса, которое получается из закона сохранения энергии [41]. Конечно-элементное решение заключается в получении значений узловых температур, на основе которых вычисляются остальные термические величины. После каждого шага нагружения проводится расчет температурных полей, возникающих в расчетной модели, результаты которого записывались в файлы с расширением LS. Для получения общего решения задачи теплопроводности необходимо выполнить совместное решение по определенному количеству LS-файлов, указав соответствующее количество шагов. В результате расчетов определены поля температур в различные моменты времени.

На рис. 7 приведено распределение температурного поля на рабочей зоне измельчителя в различные моменты времени при скорости движения пятна нагрева $v = 10$ мм/с.

На рис. 8 приведены типичные распределения температуры на режущей кромке в различных сечениях (см. рис. 5) от времени.

На рис. 9 приведено типичное распределение температурного поля для различных сечений (см. рис. 5) при скорости движения плазматрона $v = 10$ мм/с.

При исследовании НДС нож закреплялся по нижней торцевой поверхности для ограничения перемещения в направлении, перпендикулярном плоскости ножа, и по поверхности шпоночного паза для ограничения перемещения в направлении, параллельном его опорной поверхности (рис. 4, б).

На рис. 10 представлено распределение эквивалентных напряжений и суммарных перемещений на рабочей зоне измельчителя в различные моменты времени при $v = 10$ мм/с.

Для осуществления процесса поверхностной плазменной закалки в комплексе с плазменной установкой был разработан специальный манипулятор, при помощи которого осуществляется перемещение детали с заданной скоростью относительно плазменной дуги. Частота вращения стола манипулятора может изменяться до 180 об/мин. Упрочняемая деталь располагалась на столике манипулятора горизонтально. Осуществлен процесс поверхностной плазменной закалки измельчителей путем нанесения дорожек с шагом 1,5 мм на тело детали. По результатам экспериментов определены оптимальные параметры процесса поверхностного плазменного азотирования: скорость движения точки нагрева $v = 10$ мм/с, расход аргона $Q_{Ar} = 1,2$ л/мин, расход азота $Q_{N_2} = 3,6$ л/мин, ток дуги $I = 28$ А.

В результате экспериментальных исследований микротвердость поверхности детали увеличена до 466–600 $HV_{0,1}$. Экспериментально подтверждена возможность закалки при наложении соседних дорожек друг на друга с расстояниями 0,4 мм между их осями; при этом микротвердость составила 532–566 $HV_{0,1}$. Наибольшая глубина упрочненного слоя достигается при $v = 10$ мм/с, т.е. уменьшение скорости движения плазменной дуги

приводит к увеличению глубины упрочненного слоя. Упрочненные таким способом детали были установлены на длительные производственные испытания.

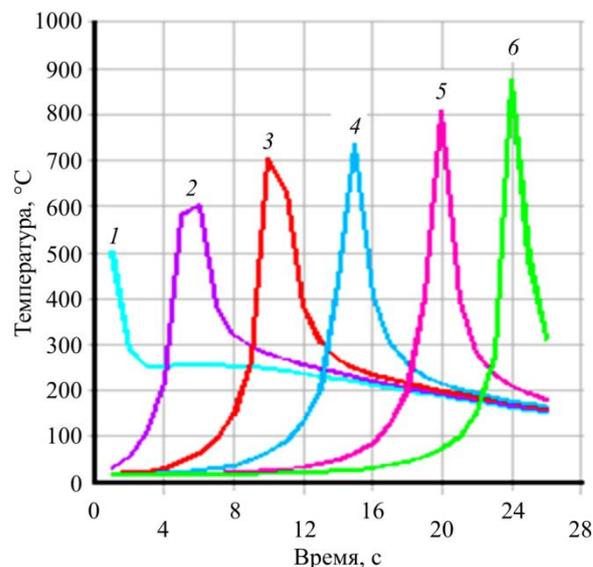
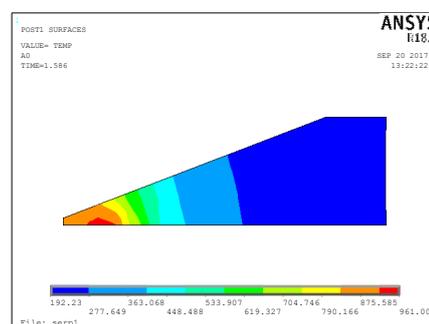
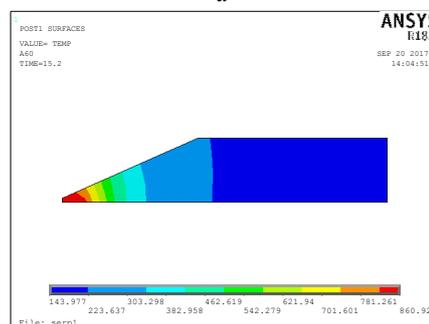


Рис. 8. Зависимость температуры на режущей кромке от времени в различных сечениях: 1 – сечение А; 2 – сечение В; 3 – сечение С; 4 – сечение D; 5 – сечение E; 6 – сечение F
Fig. 8. The dependence of the temperature on the cutting edge from time in various sections: 1 – section A; 2 – section B; 3 – section C; 4 – section D; 5 – section E; 6 – section F



а



б

Рис. 9. Распределение температурного поля в различных сечениях в момент времени, соответствующий нахождению центра источника тепла: а – в сечении А; б – в сечении D
Fig. 9. The distribution of temperature fields in different sections at a time corresponding to the finding of the center of the heat source: а – in section A; б – in section D

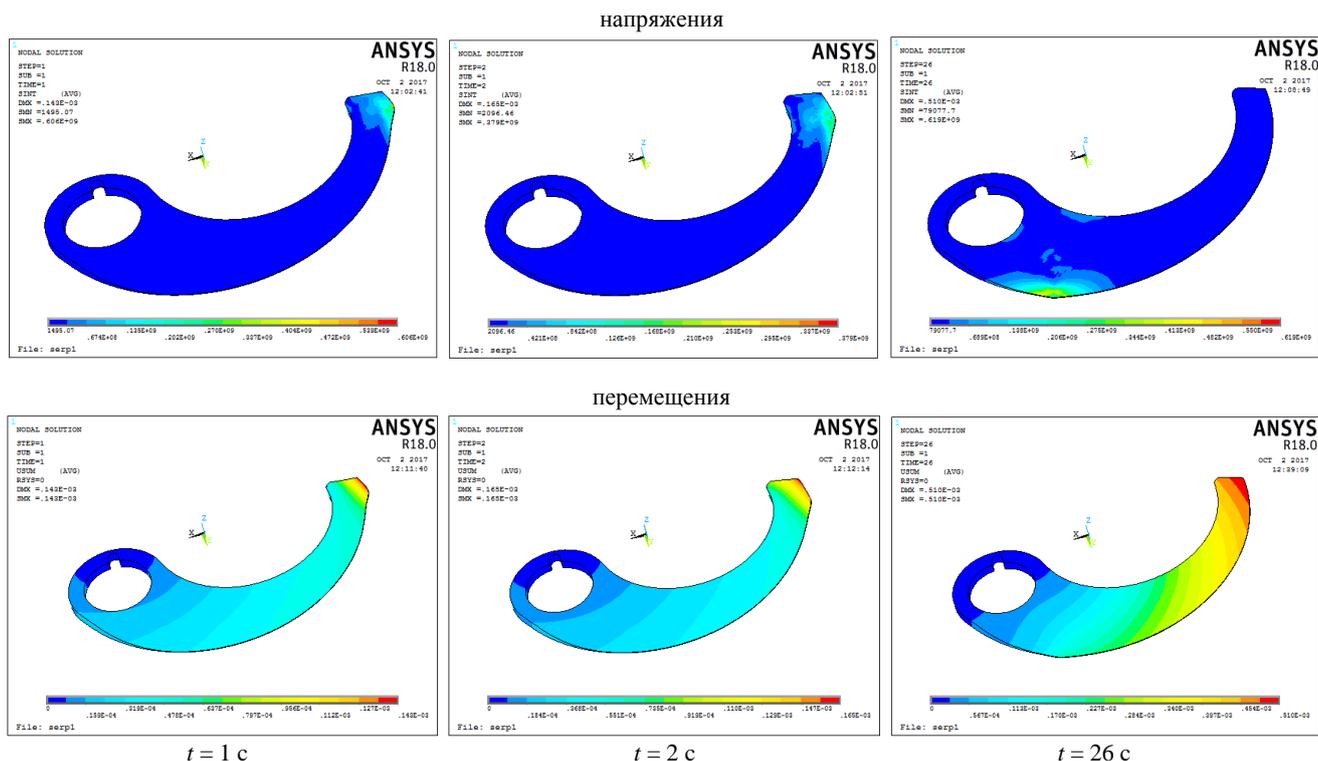


Рис. 10. Типичное поле эквивалентных напряжений по Мизесу и суммарных перемещений для различных моментов времени
 Fig. 10. Typical field of equivalent von Mises stresses and total displacements for different moments of time

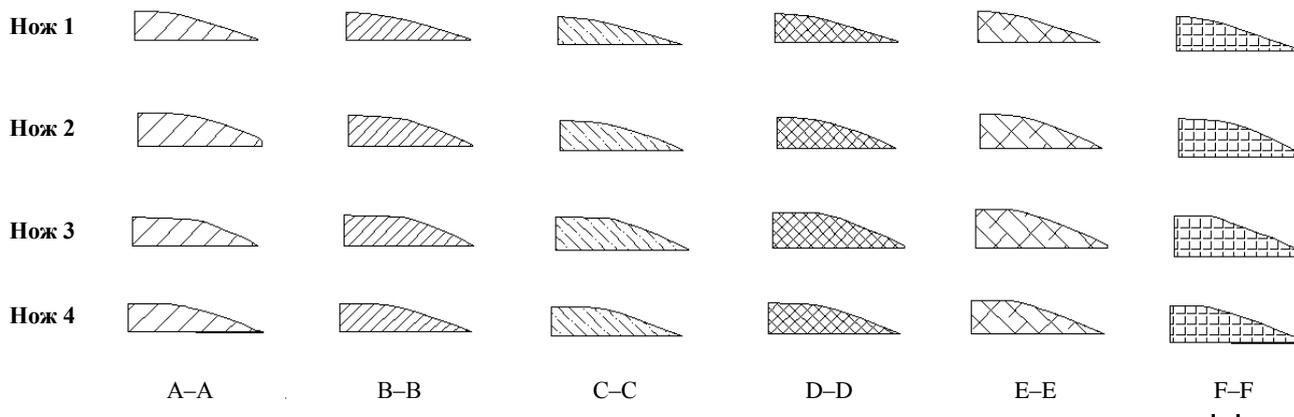


Рис. 11. Сечения, соответствующие плоскостям A–F для ножей 1–4
 Fig. 11. Sections corresponding to A–F planes for 1–4 knives

3. Исследование износостойкости ножей

Проведены теоретические исследования износостойкости упрочненных ножей. На основании полученных данных для фрагментов четырех анализируемых деталей построены кривые, описывающие геометрию исследуемой части детали в соответствующих плоскостях A – F (см. рис. 5).

На генерированных кривых строились соответствующие поверхности. Базируясь на полученных поверхностях, создавались элементы фигур анализируемых вырезов соответствующих деталей. На рис. 11 показаны соответствующие сечения исследуемых деталей.

С помощью системы автоматизированного проектирования AutoCAD вычислены площади сечений. В табл. 3 показаны результаты вычислений.

Таблица 3

Значения площадей сечений

Table 3

Values of section areas

Номер детали n	Плоскость m					
	A	B	C	D	E	F
1	95,1269	103,0503	94,6223	101,2618	109,8725	118,9291
2	92,6127	101,4331	91,9913	98,8796	105,5053	117,8067
3	89,5463	94,318	87,4971	88,0906	98,2464	116,8712
4	81,5463	76,9118	73,4262	77,951	81,6569	90,6322

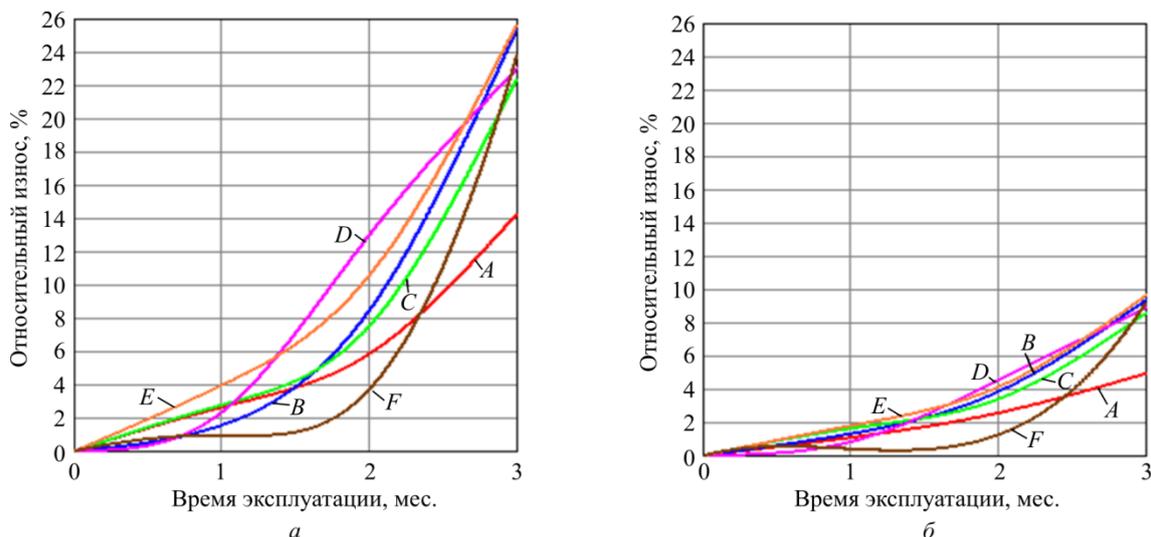


Рис. 12. Графики относительного износа ножей, упроченных: *a* – объемной закалкой; *б* – предварительной объемной закалкой и плазменным поверхностным азотированием
 Fig. 12. Graphs of the relative wear of the hardened knives using: *a* – volumetric hardening; *b* – preliminary bulk hardening and plasma surface nitriding

Для вычисления критерия износа детали Φ_{nm} воспользуемся следующей формулой:

$$\Phi_{nm} = \frac{S_{1m} - S_{nm}}{S_{1m}} 100 \%,$$

где Φ_{nm} – относительный процент износа детали; S_{nm} – поле поверхности анализируемого сечения для соответствующей n -й детали в соответствии с плоскостью m ; n – номер детали ($n = 1, 2, 3, 4$) (см. рис. 9).

По результатам исследований износостойкости измельчителей построены графики относительного износа их элементов в сечениях *A–F* после упрочнения объемной и плазменной поверхностной закалкой (рис. 12).

Анализ полученных зависимостей показал, что износостойкость ножей, упроченных путем предварительной объемной закалки и ППА, более чем в два раза выше по сравнению с проведением только объемной закалки.

Заключение

Исследованы температурное поле и напряженно-деформированное состояние при поверхностном плазменном азотировании рабочей зоны ножа из стали 14X17H2, являющегося важнейшим элементом уста-

новки для переработки пищевых продуктов. Численное решение задач теплопроводности и термоупругости для разработанной механико-математической ANSYS-модели «плазменная дуга – 3D-нож», учитывающей неравномерность распределения температуры по диаметру пятна нагрева и зависимость характеристик материала от температуры, позволило уточнить параметры плазменного азотирования и обеспечить прочность и жесткость деталей без снижения их материалоемкости.

Процесс поверхностного плазменного азотирования ножей – измельчителей пищевого сырья выполнялся на созданной плазменной установке путем нанесения дорожек с шагом 1,5 мм на рабочей зоне детали. Необходимая скорость движения источника и траектория перемещения плазменной струи автоматически выполнялась разработанным манипулятором. Определены оптимальные параметры процесса плазменного азотирования: скорость движения источника $v = 10$ мм/с, расход аргона $Q_{Ar} = 1,2$ л/мин, расход азота $Q_{N_2} = 3,6$ л/мин, ток дуги $I = 28$ А.

Выполненные с помощью измерительного комплекса Mistral 070705 исследования ножей на износостойкость показали значительное увеличение их долговечности. Срок эксплуатации ножей – измельчителей пищевого сырья увеличен в 2,3 раза.

Библиографический список

1. Тюрин Ю.Н. Плазменные упрочняющие технологии. – Киев: Наукова думка, 2008. – 215 с.
2. Саблев Л.П., Андреев А.А., Шулаев В.М. Плазменное азотирование режущего инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов: сб. докл. междунар. конф. / ННЦ ХФТИ. – Харьков, 2002. – С. 133–137.
3. Плазменное поверхностное упрочнение / Л.К. Лещинский [и др.]. – Киев: Техника, 1990. – 109 с.
4. Спиридонов Н.В., Кобяков О.С., Куприянов И.Л. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин. – Минск: Вышэйшая 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., Сазонов М.И., Хвиевич В.М. Плазменные технологии как одни из основных технологий повышения эксплуатационных свойств металлоизделий // *Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки.* – Гомель, 2008. – Вып. 2. – С. 6–12.
7. Плазменное поверхностное упрочнение / Л.К. Леггинский, С.С. Самотугин, И.И. Пирч, В.И. Комар. – Киев: Техника, 1990. – 107 с.
8. Сафонов Е.Н. Плазменная закалка деталей машин: моногр. / Нижнетагил. технол. ин-т (фил.) УрФУ. – Н. Тагил, 2014. – 116 с.
9. Поверхностное упрочнение инструментальных сталей и сплавов при нагреве высококонцентрированной плазменной струей / С.С. Самотугин [и др.] // *Упрочняющие технологии и покрытия.* – 2005. – № 3. – С. 23–28.
10. Балановский А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. – 180 с.
11. Кундас С.П. Компьютерное моделирование процессов термической обработки сталей: моногр. – Минск: Беспринт, 2005. – 313 с.
12. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров. – М.: Машиностроение. – 2004. – 510 с.
13. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д. Азотирование стали. – М.: Машиностроение, 1976. – 255 с.
14. Афонский И.Ф., Смирнов А.В., Вер О.И. Теория и практика азотирования стали. – 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., Сысун В.И. Ионно-плазменное азотирование поверхности сталей в индукционном разряде с плоской катушкой // *Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та.* – 2013. – Т. 9. – № 6-1. – С. 82–85.
17. Токарев А.В. Ионное азотирование стали в импульсном тлеющем разряде // *Вестн. 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. – Вип. 117. – Сер. Фізико-математичні науки. – С. 107.
19. Андреев А.А., Шулаев В.М., Саблев Л.П. Азотирование сталей в газовом дуговом разряде низкого давления // *ФПП ФИП 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. Tang L.N., Yan M.F. Email Influence of Plasma Nitriding on the Microstructure, Wear, and Corrosion Properties of Quenched 30CrMnSiA Steel // *Journal of Materials Engineering and Performance.* – 2013. – Vol. 22. – No. 7. – P. 2121–2129.
22. Plasma Nitriding – especially in the Gear Industry / Andreas Gebeshuber Ralph Trigueros Rübiger GmbH & Co KG. – Austria. – URL: <http://www.industrialheating.com.br/wp-content/uploads/artigos/SIR.pdf>.
23. Akhtar S.S., Arif A.F.M., Yilbas B.S. Influence of Multiple Nitriding on the Case Hardening of H13 Tool Steel: Experimental and Numerical Investigation // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2011. – Vol. 58. – P. 57–70.
24. Пахарев А.В. Повышение показателей надежности ножей куттеров путем совершенствования технологии изготовления и восстановления: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03. – Саратов, 2002. – 170 с.
25. Чижилова Т.В., Мартынов Г.А. Перспективы повышения эксплуатационной надежности режущих инструментов в мясной промышленности / *АгроНИИТЭИММП.* – М., 1987. – 43 с.
26. Пат. 10014 Україна, МПК 7 C23C 8/06. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді / Ляшенко Б.А., Рутковський А.В., Мірненко В.І, Радько О.В.; Національна академія оборони України. – № 19782; Заявл. 19.09.06; Опубл. 15.12.06, Бюл. №12 – 5 с.
27. Лахтин Ю.М., Крымский Ю.Н. Физические процессы при ионном азотировании // *Защитные покрытия на металлах.* – Вып. 2. – Киев, 1968. – С. 225–229.
28. Бугенко О.И., Головчинер Я.М., Скотников С.А. Формирование диффузионного слоя при ионном азотировании // *Прогрессивные методы термической и химико-термической обработки.* – М.: Машиностроение, 1972. – С. 122–128.
29. Некоз О.И., Колисниченко О.В., Kondrat Z. Zdislav, Батраченко А.В. Импульсно-плазмовое упрочнение ножей мясорезающих машин // *Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб.* – Киев: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2010. – Вип. 54. – С. 172–180.
30. Lapanche H. Nituration a l'assigul et ionitration // *Metallurgie et la construction mecanique.* – 1963. – No. 10. – P. 849–855; No. 11. – P. 837–953.
31. Sun Y., Li X.Y., Bell T. X-ray Diffraction Characterisation of Low Temperature Plasma Nitrided Austenitic Stainless Steels // *J. Mater. Sci.* – 1999. – Vol. 34. – P. 4793–4802.
32. Plasma-Assisted Surface Treatment. Nitriding, nitrocarburizing and oxidation of steel, cast iron and sintered materials / T. Brinke, J. Crummenauer, R. Hans, W. Opper. – Sellier Druck GmbH, D-85354 Freising, 2006. – 71 p.
33. Influence of the Process Temperature on the Steel Microstructure and Hardening in Pulsed Plasma Nitriding / L.F. Zagonel, C.A. Figueroa, R. Droppa, F. Alvarez // *Surf. Coat. Technol.* 2006. – Vol. 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.
35. Corrosion Resistance Improvement of High Carbon Low Alloy Steel by Plasma Nitriding / A. Basu, J. Dutta Majumdar, J. Alphonsa, S. Mukherjee, I. Manna // *Mater. Lett.* – 2008. – Vol. 62. – P. 3117–3120.
36. Рыкалин Н.Н., Николаев А.В., Кулагин И.Д. Тепловой поток в тело, взаимодействующее с плазменной струей // *ТВТ.* – 1965. – № 6. – С. 25–27.
37. Теоретические и экспериментальные исследования процесса поверхностного плазменного упрочнения режущего инструмента / М.И. Сазонов [и др.] // *Вестн. Брест. гос. техн. ун-та.* – 2012. – № 4. – С. 28–31.
38. Теоретические исследования температурных полей в приповерхностном слое с учетом экспериментальных данных / В.В. Батрак [и др.] // *Новые технологии и материалы, автоматизация производства: материалы междунар. науч.-техн. конф.* – Брест, 2016. – С. 194–197.
39. Гутуев М.Ш. Повышение надежности режущих рабочих органов перерабатывающего оборудования АПК путем разработки ресурсосберегающих технологий при восстановлении: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.03 / Сарат. гос. аграр. ун-т им. Н.И. Вавилова. – Саратов, 2003. – 41 с.
40. Таблицы физических величин: справочник / под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

41. Исследование температурных полей и термонапряжений в стальных деталях при поверхностной плазменной закалке / С. М. Босьяков [и др.] // Теория и практика

энергосберегающих термических процессов в машиностроении: сб. тр. междуна. научно-техн. конф. – Минск, 2008. – С. 115–118.

References

1. Tyurin Yu.N. Plazmennye uprochnyayushchie tekhnologii [Plasma strengthening technologies]. *Kiev, Naukova dumka*, 2008, 215 p.
2. Sablev L.P., Andreev A.A., Shulaev V.M. Plazmennoe azotirovanie rezhushchego instrumenta iz bystrorezhushchey stali R6M5 [Plasma nitriding of cutting tools from high-speed steel P6M5]. *Har'kov, Sbornik dokladov Mezhdunarodnoj konferencii «Oborudovanie i tekhnologii termicheskoy obrabotki metallov i splavov»*, 2002, pp.133-137.
3. Leshchinskij L.K. Plazmennoe poverhnostnoe uprochnenie [Plasma surface hardening]. *Kiev, Tekhnika*, 1990, 109 p.
4. Spiridonov N.V., Kobayakov O.S., Kupriyanov I.L. Plazmennye i lazernye metody uprochneniya detalej mashin [Plasma and laser methods for hardening machine parts]. *Minsk, Vyshejschaya shkola*, 1988, 155 p.
5. Davis J.R. Surface hardening of steels: understanding the basics. *Ohio, ASM International, Materials Park*, 2002, 319 p.
6. Veremejchik A.I., Sazonov M.I., Hwisevich V.M. Plazmennye tekhnologii kak odni iz osnovnyh tekhnologij povysheniya ekspluatatsionnyh svojstv metalloizdelij [Plasma technologies as one of the main technologies for improving the operational properties of metal products]. *Gomel', Mekhanika. Nauchnye issledovaniya i uchebno-metodicheskie razrabotki*, 2008, iss. 2, pp. 6-12.
7. Legcinskij L.K., Samotugin S.S., Pirch I.I., Komar V.I. Plazmennoe poverhnostnoe uprochnenie [Plasma surface hardening]. *Kiev, Tekhnika*, 1990, 107 p.
8. Safonov E.N. Plazmennaya zakalka detalej mashin: monografiya [Plasma hardening of machine parts: monograph]. *Nizhnij Tagil, M-vo obrazovaniya i nauki RF; FGAOU VPO «UrFU», Ulan- im. pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'cina», Nizhnetagil. tekhnol. in-t (fil.). –: NTI (filial) UrFU*, 2014, 116 p.
9. Samotugin S.S. Poverhnostnoe uprochnenie instrumental'nyh stalej i splavov pri nagreve vysokokoncentrirovannoj plazmennoj struej [Surface hardening of tool steels and alloys when heated by a highly concentrated plasma jet]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2005, no. 3, pp. 23-28.
10. Balanovskij A.E. Plazmennoe poverhnostnoe uprochnenie metallov [Plasma surface hardening of metals], *Irkutsk, IrGTU*, 2006, 180 p.
11. Kundas S.P. Komp'yuternoe modelirovanie processov termicheskoy obrabotki stalej: monografiya [Computer modeling of heat treatment of steels: monograph]. *Minsk, Bestprint*, 2005, 313 p.
12. Chigarev A.V., Kravchuk A.S., Smalyuk A.F. ANSYS dlya inzhenerov [ANSYS for Engineers]. *Moscow, Mashinostroenie*, 2004, 510 p.
13. Lahtin Yu.M., Kogan Ya.D. Azotirovanie stali [Nitriding of steel]. *Moscow, Mashinostroenie*, 1976, 255 p.
14. Afonskij I.F., Smirnov A.V., Ver O.I. Teoriya i praktika azotirovaniya stali [Theory and practice of nitriding steel]. *Lenin-grad, Gosmashmetizdat*, 1933, 160 p.
15. Balashov B.F. Azotirovanie kak metod povysheniya prochnosti detalej mashin [Nitriding as a method of increasing the strength of machine parts]. *Moscow, Mashgiz, Povyshenie ustalostnoj prochnosti detalej mashin poverhnostnoj obrabotkoj*, 1952, pp. 64-82.
16. Gura P.S., Sysun V.I. Ionno-plazmennoe azotirovanie poverhnosti stalej v indukcionnom razryade s ploskoj katushkoj [Ion-plasma nitriding of steel surfaces in an inductive discharge with a flat coil]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 9, no. 6-1, pp. 82-85.
17. Tokarev A. V. Ionnoe azotirovanie stali v impul'snom tleyushchem razryade [Ionic nitriding of steel in pulsed glow discharge]. *Vestnik KRSU*, 2009, vol. 9, no. 11, pp. 51-57.
18. Lyashenko B.A. Osobennosti azotirovaniya stali 30HGSA v pul'siruyushchem tleyushchem razryade [Features of nitriding of steel 30XГСА in pulsating glow discharge]. *Vestnik Cherkaskogo natsionalnogo universiteta. Seriya "Fiziko-matematicheskie nauki"*, 2007, iss. 117, pp. 107.
19. Andreev A.A., Shulaev V.M., Sablev L.P. Azotirovanie stalej v gazovom dugovom razryade nizkogo davleniya [Nitriding of steels in a gas arc discharge of low pressure]. *FIP FIP PSE*, 2006, vol. 4, no. 3-4, pp. 191-197.
20. Andreev A.A. Azotirovanie stali v plazme modifitsirovannogo vakuumno-dugovogo razryada [Nitriding of steel in a modified vacuum-arc discharge plasma]. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2002, no. 5, pp. 27-30.
21. L.N. Tang, M.F. Yan Email influence of plasma nitriding on the microstructure, wear, and corrosion properties of quenched 30CrMnSi steel. *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 2013, vol. 22, № 7, pp. 2121-2129.
22. Plasma Nitriding – especially in the Gear Industry. *Austria, Andreas Gebeshuber Ralph Trigueros Rübiger GmbH & Co KG* (<http://www.industrialheating.com.br/wp-content/uploads/artigos/SIR.pdf>).
23. Akhtar S.S., Arif A.F.M., Yilbas B.S.. 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. Paharev A.V. Povyshenie pokazatelej nadezhnosti nozhej kutterov putem sovershenstvovaniya tekhnologii izgotovleniya i vosstanovleniya: dissertaciya ... kandidata tekhnicheskix nauk: 05.20.03 [Increase of indicators of reliability of cutters of cutters by perfection of technology of manufacturing and restoration: the dissertation ... A Cand.Tech.Sci.: 05.20.03]. *Saratov*, 2002, 170 p.
25. Chizhikova T.V., Martynov G.A. Perspektivy povysheniya ekspluatatsionnoj nadezhnosti rezhushchih instrumentov v myasnoj promyshlennosti [Prospects for improving the operational reliability of cutting tools in the meat industry]. *Moscow, AgroNIITEIMMP*, 1987, 43 p.
26. Pat. 10014 Ukraina, MPK 7 S23S 8/06. Sposib poverhnevo zmicnennya stalevih detalej ionno-plazmovim azotuvannjam u pul'suyuchomu tliuyuchomu rozryadi: Lyashenko B.A., Rutkovskij A.V., Mirnenko V.I, Rad'ko O.V.; Nacional'na akademiya obroni Ukraini. – № 19782; Zayavl. 19.09.06; Opubl. 15.12.06, Byul. № 12 – 5 p.
27. Lahtin Yu.M., Krymskij Yu.N. Fizicheskie processy pri ionnom azotirovanii [Physical processes in ion nitriding]. *Kiev, Zashchitnye pokrytiya na metallah*, 1968, iss. 2, pp. 225-229.
28. Butenko O.I., Golovchiner Ya.M., Skotnikov S.A. Formirovanie diffuzionnogo sloya pri ionnom azotirovanii [Formation of the diffusion layer during ion nitriding]. *Moscow, Mashinostroenie, Progressivnye metody termicheskoy i himiko-termicheskoy obrabotki*, 1972, pp. 122-128.

29. Nekož O.I., Kolisnichenko O.V., Kondrat Z., Zdislav A.V. Batrachenko Impul'sno-plazmovoe uprochnenie nozhej myasorezhushchih mashin [Impulse-plasma hardening of knives for meat-cutting machines]. Kiev, Vid-vo NAU «NAU-druk» *Problemi tertiya ta znoshuvannya: nauk.-tekhn. zb.*, 2010, iss. 54, pp. 172-180.
30. Lapanche H. Nituration alassigul et ionitration. *Metallurgie et la construction mecanique*, 1963, no. 10, pp. 849-855.
31. Sun Y., Li X.Y., Bell T. X-ray diffraction characterisation of low temperature plasma nitrided austenitic stainless steels. *J. Mater. Sci.*, 1999, 34, pp. 4793-4802.
32. Brinke T., Crummenauer J., Hans R., Oppel W. Plasma-Assisted Surface Treatment. Nitriding, nitrocarburizing and oxidation of steel, cast iron and sintered materials. *Sellier Druck GmbH, D-85354 Freising*, 2006, 71 p.
33. Zagonel L.F., Figueroa C.A., Droppa R., Alvarez Jr., Alvarez F. Influence of the process nemperture on the stell microstructure and hardening in pulsed plasma nitriding. *Surf. Coat. Technol.*, 2006, 201, p. 452-457.
34. Kanetake N. Application technology of plasma nitriding. Paris, *Int. semin. Plasma Heat Treat. Set. and Technol. Senlis*. 1987, pp. 145-153.
35. Basu A., Majumdar J. Dutta, Alphonsa J., Mukherjee S., Manna I. Corrosion resistance improvement of high carbon low alloy stell by plasma nitriding, *Mater. Lett.*, 2008, 62, p. 3117-3120.
36. Rykalin N.N., Nikolaev A.V., Kulagin I.D. Teplovoj potok v telo, vzaimodejstvuyushchee s plazmennoj struej [Heat flow into the body interacting with the plasma jet]. *Teplofizika vysokikh temperature*, 1965, no. 6, pp. 25-27.
37. Sazonov M.I. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya processa poverhnostnogo plazmennogo uprochneniya rezhushchego instrumenta [Theoretical and experimental studies of the process of surface plasma hardening of cutting tools]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012. No. 4, pp. 28-31.
38. Batrak V.V. Teoreticheskie issledovaniya temperaturnyh polej v pripoverhnostnom sloe s uchedom eksperimental'nyh dannyh [Theoretical studies of temperature fields in the near-surface layer with allowance for experimental data]. Brest, *Novye tekhnologii i materialy, avtomatizaciya proizvodstva: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*, 2016, pp. 194-197.
39. Gutuev M.Sh. Povyshenie nadezhnosti rezhushchih rabochih organov pererabatyvayushchego oborudovaniya APK putem razrabotki resursosberegayushchih tekhnologij pri vosstanovlenii: avtoreferat dis. ... doktora tekhnicheskikh nauk: 05.20.03 [Increase of reliability of cutting working bodies of processing equipment of agroindustrial complex by development of resource-saving technologies at restoration: the abstract of the dis. ... Dr.Sci.Tech.: 05.20.03]. Saratov, *Sarat. gos. agrar. un-t im. N.I. Vavilova*, 2003, 41 p.
40. Kikoin I.K. Tablicy fizicheskikh velichin. Spravochnik. Moscow, *Atomizdat*, 1976, 1008 p.
41. Bosyakov S.M. Issledovanie temperaturnyh polej i termonapryazhenij v stal'nyh detalyah pri poverhnostnoj plazmennoj zakalke [Investigation of temperature fields and thermal stresses in steel parts with surface plasma quenching]. Minsk, *Teoriya i praktika energosberegayushchih termicheskikh processov v mashinostroenii: sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*, 2008, pp. 115-118.