

УДК 004.94:539.3

*А. И. ВЕРЕМЕЙЧИК, В. М. ХВИСЕВИЧ, М. И. САЗОНОВ*

*Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НОЖЕЙ ДРОБИЛЬНОЙ МАШИНЫ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАЗМЕННОМ УПРОЧНЕНИИ**

Для повышения эксплуатационных свойств дробильного инструмента предлагается упрочнение рабочей поверхности с помощью сжатой движущейся плазмы. С целью определения оптимальных режимов термообработки проведено исследование температурных полей и напряженно-деформированного состояния ножа дробильной машины. Выполнен анализ микроструктуры и микротвердости закаленных образцов. Определена степень износа термообработанных ножей.

**Ключевые слова:** упрочнение, плазменная струя, температура, температурные напряжения, микротвердость, износ.

**Введение.** Термическое упрочнение является одним из наиболее эффективных способов увеличения ресурса работы деталей машин и инструмента, а также снижения их материалоемкости [1]. Поверхностная закалка деталей при помощи движущейся плазменной струи [2–6] выделяется из всех видов термообработки, поскольку в отличие от традиционных ее способов концентрированная плазменная струя оказывает одновременное тепловое, механическое и радиационное воздействие [7]. Суть поверхностного плазменного упрочнения состоит в быстром нагреве поверхностного слоя до аустенитного состояния и интенсивном охлаждении с целью получения высокой твердости, износостойкости и прочности приповерхностного слоя в сочетании с вязкой сердцевиной самого тела. После распространения температурного поля в глубину детали на поверхности появляются сжимающие остаточные напряжения, которые могут достигать значительных величин, и которые до сих пор в достаточной мере не изучены. Величина и характер распределения этих термонапряжений изменяются в течение процесса нагрева и охлаждения. Основная причина возникновения термических напряжений – неравномерный нагрев или охлаждение различных объемов изделия. Временные (соответствующие определенному моменту времени) и остаточные (сохраняющиеся после полного выравнивания температур) структурные термические напряжения могут привести к образованию дефектов в подвергающихся термообработке изделиях. Кроме того, в последнее время появилась необходимость в совершенствовании некоторых элементов оборудования для плазменной закалки в связи с появлением новых материалов, скоростных методов их обработки, а также предъявляемых требований к качеству обрабатываемых поверхностей. Все это с учетом дорогосто-

ящего оборудования для таких исследований приводит к необходимости разработки компьютерных моделей процесса плазменного упрочнения, позволяющих варьировать режимами и параметрами процесса. Использование систем автоматизации инженерных расчетов (CAE-систем) на современном этапе является одним из наиболее эффективных способов решения задач по исследованию напряженно-деформированного состояния тел, оценке прочностных характеристик и прогнозированию долговечности конструкций. Программная система конечно-элементного анализа ANSYS является одной из наиболее эффективных CAE-систем. Программное обеспечение со специальным интерфейсом ANSYS Workbench позволяет успешно решать различные задачи механики деформируемого твердого тела, теплофизики и т. д.

Цель работы состоит в изучении механизма разрушения ножа для измельчения древесных отходов мебельного и других производств, теоретическом исследовании температурных полей и термонапряжений в ноже для оптимизации режимов его термообработки и разработки методов увеличения надежности и долговечности при помощи поверхностной плазменной закалки движущейся плазменной струей.

**Объект и предмет исследования.** Нож дробильной машины представляет собой усеченную пирамиду из конструкционной легированной стали 40X (рисунок 1, а, б). В процессе изготовления ножи подвергаются предварительной объемной закалке до 34–42 HRC.

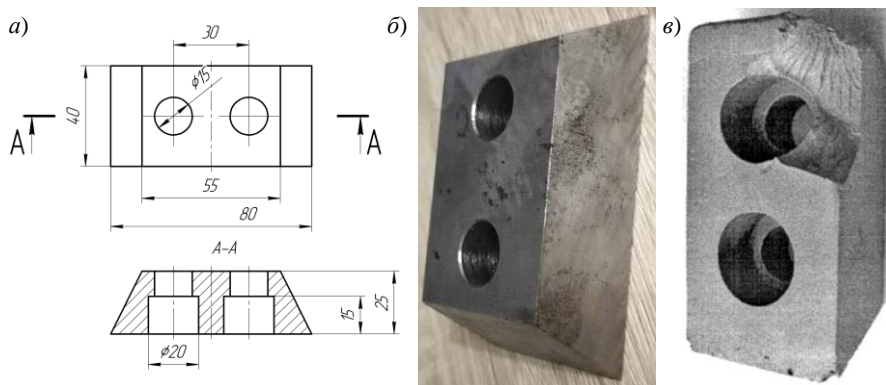


Рисунок 1 – Нож дробильной машины:  
а – чертеж; б – внешний вид; в – после эксплуатации

Анализ характера повреждаемости и износа ножей позволил выявить основные дефекты в процессе эксплуатации: смятие и сколы режущей кромки, разрушение полотна детали, отламывание кусков в периферийной зоне, трещины и вмятины на поверхности, поверхностная коррозия металла [8] (рисунок 1, в). Результаты проведенных экспериментов позволили установить, что объемная термозакалка не обеспечивает требуемой прочности поверхностного слоя детали.

Для повышения износостойкости в процессе трения и увеличения сопротивляемости пластическому и хрупкому разрушению предлагается применить предварительную объемную закалку и поверхностную плазменную термообработку детали как наиболее полно обеспечивающую оптимальное сочетание величины вязкости сердцевины детали с высокой поверхностной твердостью. Такое упрочнение реализуется путем локальной закалки с помощью быстро перемещающегося высокоинтенсивного концентрированного источника тепла – плазменной струи, генерируемой плазмотроном постоянного тока мощностью до 1,4 кВт, и характеризуется рядом преимуществ:

- достаточно малой глубиной закалки до 0,7 мм и лишь в местах износа;
- твердость и износостойкость поверхностного слоя значительно выше, чем при объемной закалке;
- отсутствие термических деформаций благодаря локальности и кратковременности взаимодействия струи плазмы с поверхностью металла.

При поверхностной закалке ножи укладываются в ряд, и производится последовательное упрочнение рабочей зоны за один рабочий ход плазмотрона, благодаря интенсивному теплоотводу внутрь детали.

Плазменная установка состоит из плазмотрона постоянного тока, силового источника питания, высокочастотного устройства поджига дуги, системы газоснабжения плазмотрона аргоном и азотом и системы водоохлаждения плазмотрона [9]. Для перемещения плазмотрона с заданной скоростью создано специальное механическое устройство. Силовой источник обеспечивает горение дуги при напряжениях 14–35 В и токах до 30 А, а его напряжение холостого хода не превышает 60 В. В плазмотроне используется вольфрамовый катод, который работает в среде аргона с малым расходом, а зона закалки защищается потоком аргона или азота.

**Моделирование воздействия концентрированного плазменного потока.** Для разработки оптимальных режимов термообработки проведено исследование температурных полей и напряжений при упрочнении зоны режущей кромки ножа. Для моделирования и расчетов использовалась конечно-элементная расчетная платформа *ANSYS Workbench 2019 R2*. Все физические и термодинамические свойства материала, зависящие от температуры, задавались в табличном виде (таблица 1) [10] с помощью модуля управления материалами, представленном в *ANSYS Workbench* элементом *Engineering Data*, входящим в структуру блока инженерного анализа.

Построение геометрической модели детали выполнено с использованием графического модуля *ANSYS SpaceClaim*. Сетка, состоящая из 4334 конечных элементов, построена при помощи модуля *Mesh*. В зоне воздействия источника тепла с помощью команды *Edge Sizing* задается уплотненная сетка. Схема нагружения режущей части ножа движущимся источником тепла и его конечно-элементная модель приведены на рисунке 2.

Таблица 1 – Характеристики стали 40Х в зависимости от температуры

Свойства	Температура, °С									
	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Модуль упругости $E$ , ГПа	214	211	206	203	185	176	164	143	132	132
Коэффициент Пуассона $\nu$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Плотность $\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup>	7850	7850	7800	7800	7800	7650	7650	7650	7650	7650
Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°С)	42	39	36	34	32	30	28	26	24	22
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$ , 1/°С	11,9	12,2	13,2	13,7	14,1	14,6	14,8	15,0	15,0	15,0
Удельная теплоемкость $c$ , Дж/(кг·°С)	466	508	529	563	592	622	634	664	664	664

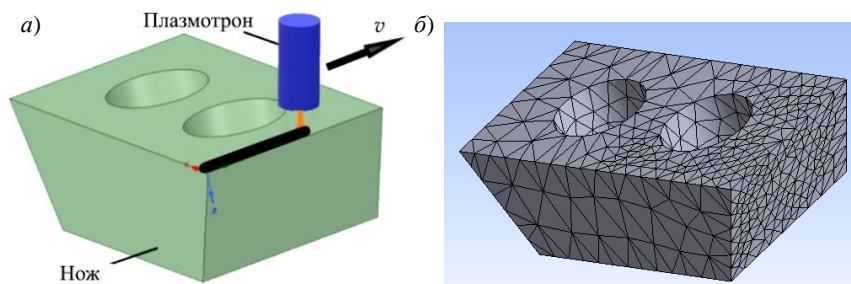


Рисунок 2 – Схема теплового нагружения ножа (а) и его конечно-элементная модель (б)

Решение нестационарной задачи термоупругости на базе *ANSYS Mechanical Enterprise* проводится в два этапа. На первом в модуле *Transient Thermal* проводится анализ температурного поля путем решения задачи нестационарной теплопроводности. В соответствии со скоростью движения плазменной струи к узлам конечно-элементной модели ножа вдоль режущего лезвия пошагово последовательно прикладывалась температурная нагрузка. Для моделирования распространения температуры вглубь детали создан макрос на параметрическом языке программирования *APDL (ANSYS Parametric Design Language)*, в котором для учета температурной нагрузки использовалась зависимость

$$q = q_n \exp\left(-\frac{(x^2 + (y - vt)^2)}{r_n^2}\right), \quad (1)$$

где  $q_n = Q / (\pi r_n^2)$ ;  $Q$  – тепловой поток, Вт;  $r_n = 0,5d$  – радиус пятна нагрева, м;  $x, y, z$  – координаты центра пятна нагрева, м;  $v$  – скорость движения источника тепла, м/с.

С учетом того, что температура плазменной струи на расстоянии 50 мм от среза сопла плазмотрона может достигать 6000 °С [11–13], а температура плавления стали 40X равна 1420 °С, на всех поверхностях модели ножа задавалась конвекция с коэффициентами теплоотдачи  $\alpha = 5 \dots 30$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С), причем учитывалась его зависимость от температуры окружающей среды, температуры стенки, формы поверхности, направления теплового потока и т. д. Начальная температура принималась равной 20 °С. Расстояние от центра пятна нагрева до вершины лезвия в процессе перемещения пятна нагрева не менялось и варьировалось в пределах  $s = 2 \dots 5$  мм, скорость движения источника тепла –  $v = 2 \dots 20$  мм/с, диаметр пятна нагрева изменялся в диапазоне  $d = 3 \dots 6$  мм.

**Некоторые результаты теоретических исследований и их обсуждение.** В ходе решения задачи теплопроводности для широкого диапазона параметров получены результаты в виде линий равного уровня, отражающих распределение температуры в ноже. Некоторые результаты приведены на рисунке 3. Наряду со схемами для объема в целом (см. рисунок 3, а, б) с помощью функции *Section Plane* получено распределение температур в сечении плоскостью, показывающее изменение температуры по поверхности и толщине ножа (см. рисунок 3, в, з).

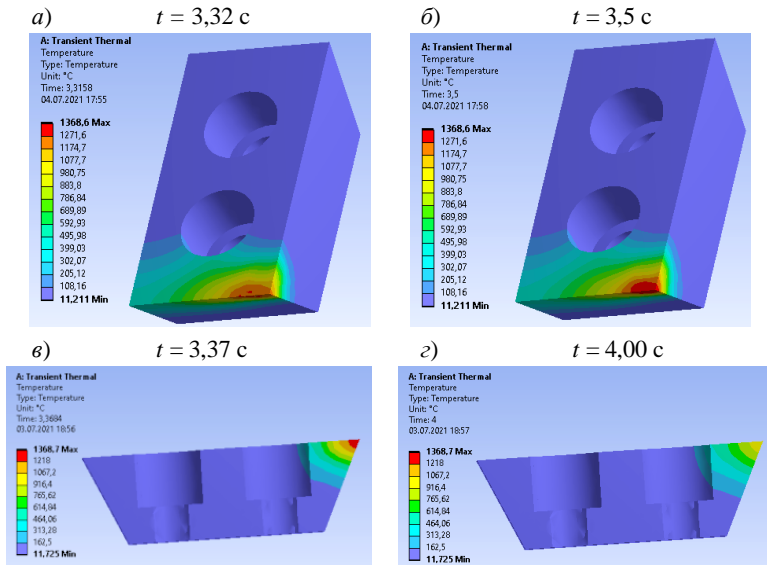


Рисунок 3 – Распределение полей температур на поверхности модели ножа (а, б) и в сечении (в, з) при скорости движения источника нагрева  $v = 11,2$  мм/с,  $s = 2,5$  мм,  $d = 5$  мм,  $q_n = 7,45 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup> (без оплавления поверхности)

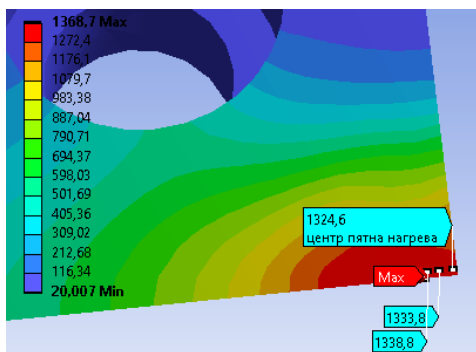


Рисунок 4 – Распределение температур в зоне термообработки при  $t = 4$  с,  $v = 10$  мм/с,  $d = 5$  мм,  $s = 2,5$  мм,  $q_n = 7 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>

По результатам исследований установлено, что зона термического воздействия плазменного источника в поперечном сечении детали имеет форму сегмента. Анализ температурных полей в модели ножа показывает, что при движении источника нагрева точка, в которой возникает максимальная температура, отстает от центра пятна нагрева, в котором плотность теплового потока максимальна (рисунок 4).

Результаты теплового анализа сохраняются в отдельном файле

и используются при проведении статического анализа (определении напряженно-деформированного состояния) модели в качестве внешней нагрузки.

На втором этапе в модуле *Static Structural* на базе *ANSYS Mechanical* решается связанная задача термоупругости по исследованию напряженно-деформированного состояния ножа при воздействии движущегося концентрированного источника тепла. Граничные условия соответствовали реальным условиям закрепления ножа при его термообработке. При определении напряжений и деформаций нож закреплялся по верхней плоскости для ограничения перемещения в направлении, перпендикулярном направлению движения струи, и по отверстиям.

При высокой концентрации энергии ( $q_n > 7,5 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>) в тонком поверхностном слое ножа этот слой может разогреться до температур, превышающих температуру плавления, что полностью перейдет в жидкое состояние, а после прекращения нагрева будет затвердевать с высокой скоростью охлаждения из-за быстрого отвода теплоты внутрь объема детали. Некоторые результаты статического анализа модели ножа при термообработке без оплавления и с оплавлением поверхности приведены на рисунках 5, 6.

Результаты моделирования показали, что при превышении температуры плавления на поверхности происходит значительный рост термонапряжений и температурных деформаций в ноже, поэтому необходимы экспериментальные исследования влияния параметров нагружения на характеристики поверхностного слоя.

Полученные результаты нестационарного теплового и статического анализа использованы для определения оптимальных режимов работы и геометрических параметров плазматрона.

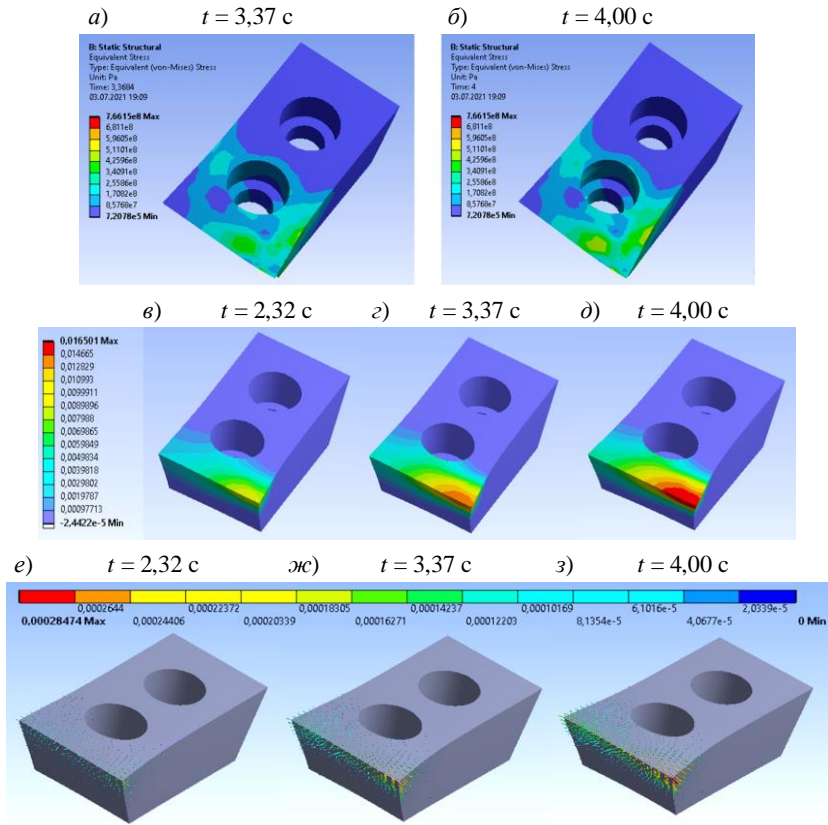


Рисунок 5 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу (а, б) (Па), температурных деформаций (в–д) и векторное поле перемещений (е–з) (м) в конечно-элементной модели ножа при температурном нагружении без оплавления,  $v = 10 \text{ мм/с}$ ,  $d = 5 \text{ мм}$ ,  $s = 2,5 \text{ мм}$ ,  $q_n = 7 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2$

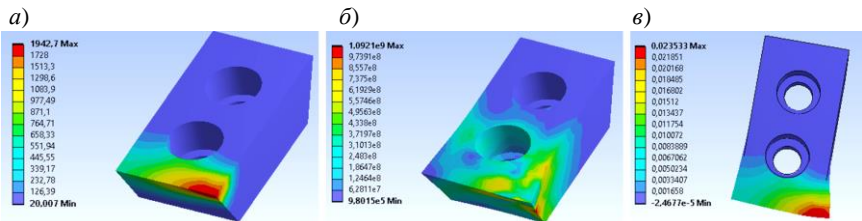


Рисунок 6 – Температурное поле (а) (°C), эквивалентные напряжения по Мизесу (б) (Па), температурные деформации (в) на поверхности ножа при термообработке с оплавлением при  $t = 4 \text{ с}$ ,  $v = 10 \text{ мм/с}$ ,  $d = 5 \text{ мм}$ ,  $s = 2,5 \text{ мм}$ ,  $q_n = 8,4 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2$

**Экспериментальные исследования упрочненных образцов.** В реальных условиях термообработка ножей плазменной струей проводилась без оплавления и с оплавлением в среде защитных газов аргона и азота. Металлографический анализ аналогично теоретическому расчету показал, что характер термического воздействия плазменной струи по глубине ножа имеет форму сегмента (рисунок 7, а). Структура стали видоизменена, по сравнению с исходной, и состоит из характерных зон. В закаленной зоне при обработке без оплавления наблюдается высокодисперсный мартенсит (рисунок 7, б), далее располагается нерегулярный мартенсит с остаточным аустенитом и затем – зона с фрагментами карбидов. Следует отметить, что аустенит в этой стали более устойчив к распаду в связи с наличием легирующих элементов хрома и вольфрама, которые образуют с углеродом карбиды, препятствующие насыщению аустенита углеродом [14–16], что незначительно уменьшает скорость упрочнения.

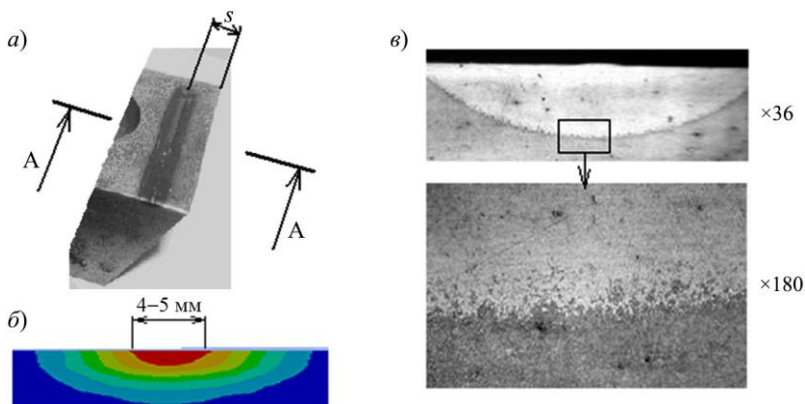


Рисунок 7 – Микроструктура стали 40X после плазменного упрочнения,  $s = 6$  мм: а – рассматриваемое сечение; б – зона термического влияния (решение ANSYS); в – микроструктура

Повышение степени дисперсности закаленной структуры стали 40X обусловлено высокой степенью тетрагональности мартенсита, плотности дислокаций, измельчения пластин мартенсита. Важное значение при этом имеет также содержание остаточного аустенита в закаленной зоне стали и особенно во втором приповерхностном слое.

Эксперименты показали, что глубина упрочненного слоя значительна и достигает 0,6 мм. Микротвердость при обработке детали в защитной среде аргона без оплавления почти в 1,8 раза выше исходной, а с оплавлением – в 2,3 раза. Следует отметить, что при упрочнении без оплавления шероховатость поверхности практически не изменилась.

Проведены эксперименты по упрочнению деталей из стали 40X поверхностной плазменной закалкой с применением азота в качестве защитного газа. Упрочнение осуществлялось при токе  $I = 26$  А, напряжении дуги  $U = 24$  В, скорости движения плазменной струи  $v = 11,2$  мм/с, расход аргона  $Q_{Ar} = 1,9$  л/мин,



расход азота  $Q_{N_2} = 3,1$  л/мин. Как и в предыдущем случае, процесс осуществлялся как с оплавлением, так и без оплавления поверхности, соответственно из жидкого состояния и твердой фазы. Исследования показали, что эффект влияния защитных газов аргона и азота на микротвердость стали 40X качественно подобны. Ширина упрочненной дорожки составляет 4–5 мм (см. рисунок 7). Результаты измерения микротвердости в поперечном сечении образцов показали больший ее прирост (100–150  $HV_{0,1}$ ) в сравнении с вариантом упрочнения с применением аргона в качестве защитного газа (рисунок 8).

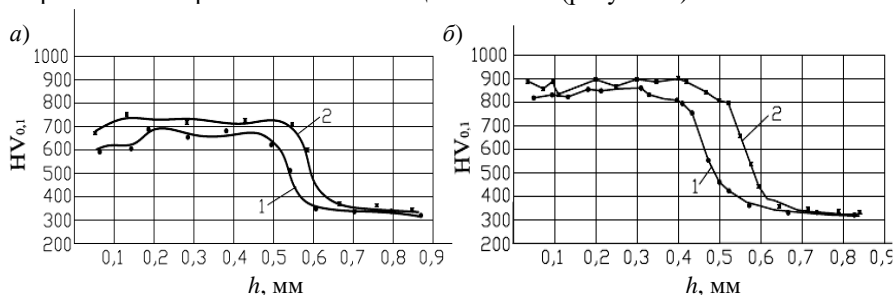


Рисунок 8 – Характер распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя ножей при аргоне (а) и азоте (б) в зоне закалки:

1 – без оплавления; 2 – с оплавлением

Наибольшая микротвердость наблюдается у поверхностного слоя. Глубина упрочняемого слоя достигает 0,5–0,6 мм. Далее зависимость равномерная, затем по глубине слоя микротвердость плавно снижается до исходного значения. Исследования микротвердости по ширине дорожки при обработке ножей показали, что она соответствует нормальному закону.

Упрочнение поверхности изделий отдельными полосками является специфической особенностью обработки поверхностей локальными высококонцентрированными плазменными потоками. В работе [3] отмечается, что при наложении полосок появляются зоны отпуска и микротвердость снижается, а при расположении их встык сохраняются зоны разупрочнения, которые могут выполнять функцию «карманов» смазки в условиях поверхностного трения и повышают износостойкость поверхности.

**Исследование износостойкости ножей.** Проведены натурные производственные испытания ножей в процессе измельчения древесных отходов на износостойкость. Известно [2], что долговечность и износостойкость поверхностного слоя изделий в основном зависят от характера распределения микротвердости по глубине слоя в пределах допуска на износ. Например, при абразивном механизме изнашивания изделий параметры микротвердости и износостойкости хорошо согласуются между собой. При дроблении древесных отходов нож подвергается абразивному износу и воздействию динамических нагрузок. Поэтому те свойства, которые приобретает деталь при поверхностном упрочнении с помощью плазменной струи, позволяют существенно увеличить его долговечность [12].

Для определения степени износа выбирались две партии деталей: упрочненных объемной закалкой и с помощью плазменной струи без оплавления поверхности. В каждую партию включались детали: базовая (№ 1) и № 2–5 – после эксплуатации. Сравнительные измерения их профиля выполнялись на измерительном комплексе с лазерным сканированием *Mistral 070705* фирмы *Brown&Sharpe* с программным обеспечением *PC-DMIS PRO Software*, позволяющим производить контроль в 3D с предоставлением протоколов контроля (точность измерения 0,003 мм). По результатам измерений вводилась форма детали в формате .igs и результаты обрабатывались программой *SolidWorks*, с помощью которой строилась компьютерная модель. Затем она разделялась плоскостями *A–D* на части, с выделением плоскостью *T* исследуемого фрагмента (рисунок 9, *a*).

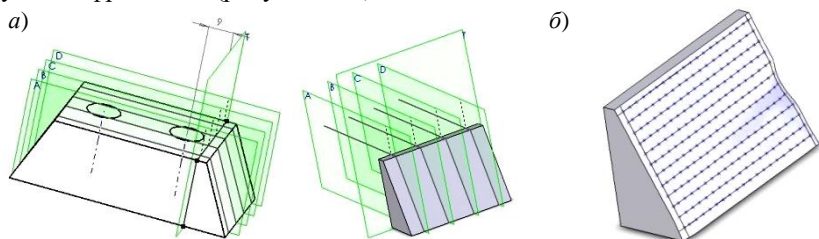


Рисунок 9 – Положение плоскостей для анализа исследуемого фрагмента (*a*) и поверхность анализируемого фрагмента детали (*b*)

На сгенерированных кривых с помощью техники «вытягивания» профилей построена поверхность (рисунок 9, *b*) анализируемой части детали. Используя плоскости *A–D*, с помощью графического редактора *AutoCAD 2018* построены плоские элементы соответствующих фрагментов деталей и вычислены площади их поверхностей. Для вычисления относительного износа детали использовалась формула

$$\Phi_{nm} = \frac{S_{1m} - S_{nm}}{S_{1m}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где  $S_{nm}$  – площадь поверхности анализируемого сечения для соответствующей детали с номером  $n$  ( $n = 1 \dots 5$ ) в соответствии с плоскостью  $m$  ( $m = A \dots D$ ).

Полученные графики относительного износа ножей, упрочненных предварительной объемной закалкой и поверхностной плазменной закалкой (рисунок 10) показывают значительное повышение износостойкости ножей после их дополнительной термообработки плазменной струей.

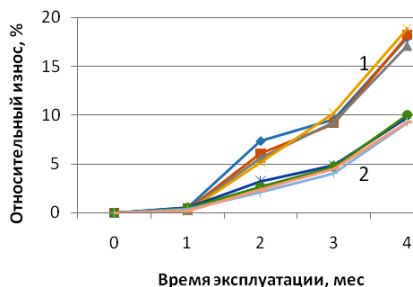


Рисунок 10 – Износ ножей из стали 40X, упрочненных:

1 – объемной закалкой; 2 – предварительной объемной и поверхностной плазменной закалкой

**Заключение.** Создана конечно-элементная модель распространения тепла в ноже дробильной машины из стали 40X при его упрочнении движущейся плазменной струей. В среде *ANSYS Workbench* разработан алгоритм программной реализации решения задач теплопроводности и термоупругости при действии движущегося высококонцентрированного источника тепла. Осуществлено численное решение нестационарных задач теплопроводности и термоупругости для разработанной ANSYS-модели «плазменная струя – нож», учитывающих неравномерность распределения направленного теплового потока по диаметру пятна нагрева и зависимость характеристик материала от температуры. Исследованы температурное поле и напряженно-деформированное состояние при поверхностной плазменной закалке рабочей зоны ножа, что стало теоретической базой для определения оптимальных режимов процесса термообработки.

Применение концентрированного потока плазмы позволило осуществить поверхностное упрочнение инструмента в зонах интенсивного износа, сохраняя пластичными свойства его сердцевины. 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. Вариация параметров плазменного воздействия, типа плазмы обеспечивает повышение коррозионной стойкости сталей и сплавов.

Экспериментально подтверждена возможность упрочнения без оплавления при наложении соседних дорожек друг на друга с расстояниями между осями 0,4–0,5 мм.

Экспериментами установлен значительный эффект упрочнения путем поверхностной плазменной закалки ножа из стали 40X. В зоне воздействия плазменной струи микроструктура состоит из однородного высокодисперсного мартенсита, остаточного аустенита и карбидов. Исследования степени износа показали, что износостойкость ножа машины для измельчения отходов древесины при использовании локального плазменного упрочнения увеличилась в 2,2 раза по сравнению с объемной закалкой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н. В. Спиридонов [и др.]. – Минск : Выш. шк., 1988. – 155 с.
- 2 **Тюрин, Ю. Н.** Плазменные упрочняющие технологии / Ю. Н. Тюрин. – Киев : Наук. думка, 2008. – 215 с.
- 3 Плазменное поверхностное упрочнение / Л. К. Лещинский [и др.]. – Киев : Техніка, 1990. – 109 с.
- 4 Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics / J. R. Davis [et al.]. – Materials Park, Ohio : ASM International, 2002. – 319 p.
- 5 **Сафонов, Е. Н.** Плазменная закалка деталей машин : монография / Е. Н. Сафонов. – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2014. – 116 с.

6 **Домбровский, Ю. М.** Физические и технологические основы метода поверхностного плазменного упрочнения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.01 / Ю. М. Домбровский / Дон. гос. техн. ун-т. – Ростов н/Д., 1999. – 51 с.

7 **Крауз, В. И.** Энциклопедия низкотемпературной плазмы / В. И. Крауз, Ф. Симоне, Д. Моуренас ; Сер. Б. Справочные приложения, базы и банки данных. Тематический том IX-3. Радиационная плазмодинамика. – М. : Янус-К, 2007. – 590 с.

8 **Веремейчик, А. И.** Исследование поверхностного упрочнения деталей движущейся плазменной дугой / А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич // Актуальные проблемы прочности, гл. 24. – Молодечно : Типография «Победа», 2020. – С. 301–315.

9 Установка для поверхностного упрочнения деталей и инструмента / А. И. Веремейчик [и др.] // Создание новых и совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических и их замещающих покрытий : материалы 3-го Респ. науч.-техн. сем. – Минск : БГТУ, 2013. – С. 116–119.

10 Таблицы физических величин. Справочник / под ред. И. К. Кикоина. – М. : Атомиздат, 1976. – 1008 с.

11 **Балановский, А. Е.** Плазменное поверхностное упрочнение металлов / А. Е. Балановский. – Иркутск : ИрГТУ, 2006. – 180 с.

12 **Веремейчик, А. И.** Исследование полей температур по глубине упрочняемой детали при воздействии движущейся плазменной дуги / А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич // Механика XXI века. – 2020. – № 19. – С. 260–267.

13 **Николаев, А. В.** Тепловые и силовые характеристики плазменной струи аргона : дис. ... канд. техн. наук / А. В. Николаев / ИМЕТ А. А. Байкова. – М., 1961. – 145 с.

14 **Рыкалин, Н. Н.** Тепловой поток в тело, взаимодействующее с плазменной струей / Н. Н. Рыкалин, А. В. Николаев, И. Д. Кулагин // Теплофизика высоких температур. – 1965. – Т. 3, № 6. – С. 871–878.

15 **Гирина, О. А.** Влияние микролегирующих элементов на структуру и свойства низкоуглеродистых и ультранизкоуглеродистых холоднокатаных сталей / О. А. Гирина, Н. М. Фонштейн, Л. М. Сторожева // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1993. – № 5. – С. 21–22.

16 **Ismail, M. I. S.** Surface hardening of tool steel by plasma arc with multiple passes / M. I. S. Ismail, Z. Taha // International Journal of Technology. – 2014. – Vol. 5, no. 1. – P. 79–87.

*A. VEREMEICHIK, V. KHVISEVICH, M. SAZONOV*  
*Brest State Technical University, Brest, Belarus*

## **INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE FIELD AND THE STRESS-STRAIN STATE OF THE CRUSHING MACHINE KNIVES DURING SURFACE PLASMA HARDENING**

To improve the operational properties of the crushing tool, it is proposed to use plasma hardening of the working surface using compressed moving plasma. In order to determine the optimal modes of heat treatment, the study of temperature fields and the stress-strain state of the crushing machine knife was carried out. The analysis of the microstructure and microhardness of the hardened samples is carried out. The degree of wear of heat-treated knives is determined.

**Keywords:** hardening, plasma jet, temperature, temperature stresses, microhardness, wear.

Получено 27.09.2021