

7. Ажар А. В., Минасян Г. О., Кошевой А. Н. Оптимизация операции заточки затылованных дисковых фасонных фрез методами компьютерного 3D моделирования. Научное издание «НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ – 2020». Сборник материалов VII Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума 17–18 ноября 2020 года. ТОМ 1, г. Минск, БНТУ, 2020. – 252 с. (с. 87 – 89).

8. Ажар А. В., Минасян Г. О. Оптимизация заточки затылованных насадных фасонных фрез методами 3D моделирования. Научное издание «II КИТАЙСКО-БЕЛОРУССКИЙ МОЛОДЕЖНЫЙ КОНКУРС НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ». Сборник материалов конкурса 20–21 мая 2021 года. г. Минск, БНТУ, 2021. – 240 с. (с. 98).

9. Минасян Г. О. Использование методов компьютерного 3D моделирования для оптимизации операции затылования сложнопрофильной фрезы. НИРС МСФ–2021. Сборник материалов 77-й студенческой научно-технической конференции / сост.: О. К. Яцкевич и др. – Минск: БНТУ, 2021. – 46 с. (с. 4–8).

10. Ажар А. В., Осадчий Е. Н., Ишкуло П. Ю. 3D моделирование оптимального затылования дисковых модульных фрез. Научное издание «НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ – 2021». Сборник материалов VIII Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума 11–12 ноября 2021 года. ТОМ 1, г. Минск, БНТУ, 2021. – 188 с. (с. 20–22).

11. Ажар А. В., Осадчий Е. Н., Ишкуло П. Ю. Анализ операции затылования стандартных дисковых модульных фрез методом 3D –моделирования. «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» «Технология – Оборудование – Инструмент – Качество»: тезисы докл. междуна. науч.-техн. конф. (Минск, 7 апреля 2022 г.) / редкол.: В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2022. – 115 с. (с.104–107).

*Поступила 17.10.2022*

**УДК 674.059:621.793**

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

## **ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДРОБИЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ**

*Брестский государственный технический университет,  
Брест, Беларусь*

*В работе рассмотрен процесс поверхностного плазменного упрочнения режущей части ножей дробильной установки, проведено его моделирование с использованием вычислительного комплекса ANSYS Workbench и подобраны оптимальные режимы обработки. Проведены натурные производственные испытания износостойкости ножей, определен их относительный износ после объемной и поверхностной плазменной закалки при помощи пакетов программ компьютерного моделирования AutoCAD и SolidWorks, а также комплекса с лазерным сканированием поверхности Mistral 070705 фирмы Brown&Sharpe.*

При использовании установок для дробления и переработки древесных отходов деревообрабатывающей промышленности в качестве дробильного инструмента применяются детали (ножи) в виде усеченной пирамиды из конструкционной легированной стали 40X (рис. 1), подвергнутые термообработке в виде объемной закалки. В процессе эксплуатации эти детали подвергаются интенсивному механическому изнашиванию и воздействию динамических нагрузок. Визуальный осмотр деталей выявил ряд типичных для такого рода инструмента дефектов – затупление, растрескивание и выламывание режущей кромки, разрушение части полотна детали, скалывание металла размерами до 2 см в периферийной зоне [1]. Такой вид разрушения характерен при упрочнении деталей объемной закалкой и обусловлен возникновением в металле значительных механических напряжений и охрупчивания стали.



Рис. 1. Нож дробильной машины

Для исключения возникновения дефектов в материале осуществляется упрочнение режущей кромки ножей с помощью поверхностной плазменной закали (ППЗ) движущейся плазменной дугой [2; 3], заключающейся в нагреве поверхностного слоя до аустенитного состояния и быстром охлаждении с целью получения высокой твердости, износостойкости, прочности в поверхностном слое в сочетании с вязкой сердцевиной. Термическая обработка плазменно-дуговым методом вызывает появление в детали внутренних напряжений, величина и характер распределения которых изменяются в течение всего процесса нагрева или охлаждения материала. Основной причиной термических напряжений являются неодинаковые скорости нагрева (охлаждения) различных объемов изделия, что приводит к образованию различных дефектов в подвергающихся термообработке деталях.

Для разработки оптимальных режимов термообработки проведены исследования температурных полей при упрочнении режущей кромки ножа с помощью конечно-элементной расчетной платформы *ANSYS Workbench 2019 R2*. Все физические и термодинамические свойства материала, зависящие от температуры, задавались в табличном виде (табл. 1) [4] с помощью модуля управления материалами, представленном в *ANSYS Workbench* элементом *Engineering Data*, входящим в структуру блока инженерного анализа.

Таблица 1 – Физико-механические и термодинамические характеристики стали 40X

Свойства	Температура, °С											
	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1200
Модуль упругости E, ГПа	214	211	206	203	185	176	164	143	132	132	131	131
Коэффициент Пуассона $\nu$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7850	7850	7800	7750	7700	7660	7620	7580	7550	7520	7490	7470
Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м×К)	46	46	42,7	42,3	38,5	35,6	31,9	28,8	26	26,7	28	28,8
Коэффициент линейного расширения $\alpha \times 10^6$ , К <sup>-1</sup>	11,9	11,9	12,5	13,2	13,8	14,1	14,4	14,6	15,0	15,0	15,0	15,0
Удельная теплоемкость $c$ , Дж/(кг×К)	466	466	508	529	563	592	622	634	664	664	664	664

Построение геометрической модели детали выполнено с использованием графического модуля *ANSYS SpaceClaim*. Сетка построена при помощи модуля *Mesh*. В зоне воздействия локального источника тепла, моделирующего процесс воздействия плазмы, с

помощью команды *Edge Sizing* задается уплотненная сетка. Схема нагружения режущей части ножа движущимся источником тепла приведена на рис. 2.

Решение задачи термоупругости при воздействии локального движущегося источника тепла на базе *ANSYS Mechanical Enterprise* проводится в два этапа. На первом этапе в модуле *Transient Thermal* исследуется анализ температурного поля на основе решения задачи нестационарной теплопроводности. Для моделирования распространения температуры вглубь детали создан макрос для *ANSYS Mechanical* на языке программирования *APDL*, в котором задаются характеристики температурной нагрузки, скорость движения источника нагрева, координаты его начального положения, время движения и др. В соответствии со скоростью движения плазменной дуги к узлам конечно-элементной модели ножа вдоль режущего лезвия пошагово прикладывалась температурная нагрузка.

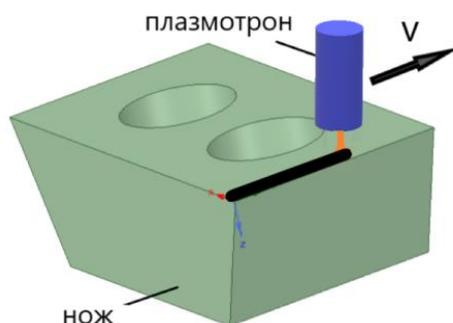


Рис. 2. Схема теплового нагружения кромки ножа

В *APDL*-макросе для учета температурной нагрузки использовалась зависимость:

$$q = q_H \exp \left[ \left[ - \frac{(x^2 + (y - vt)^2)}{r_H^2} \right] \right], \quad (1)$$

где  $q_H = \frac{Q}{\pi r_H^2}$ ;

$Q$  – тепловой поток, *Вт*;

$r_H = \frac{d}{2}$  – радиус пятна нагрева, *м*;

$x, y$  – координаты центра пятна нагрева, *м*;

$v$  – скорость движения источника тепла, *м/с*.

Начальная температура принималась равной 20 °С. На поверхностях модели ножа задавалась конвекция с различными коэффициентами теплоотдачи  $\alpha = (5 \dots 30) \text{ Вт} / (\text{м}^2 \times \text{°С})$ . При задании коэффициента  $\alpha$  учитывалась его зависимость от температуры окружающей среды, температуры и формы поверхности, направления теплового потока и т. д. Расстояние от центра пятна нагрева до вершины лезвия инструмента в процессе перемещения плазмотрона при термообработке не менялось. Численный эксперимент проводился при следующих параметрах:  $s = (2 \dots 5) \text{ мм}$ , диаметр пятна нагрева  $d = (2 \dots 4) \text{ мм}$ ,  $v = (2 \dots 20) \text{ мм/с}$ .

В результате теоретических исследований динамической модели в широком диапазоне параметров было получено решение задачи теплопроводности. Некоторые результаты приведены на рис. 3. Установлено, что зона термического воздействия плазменного источника в поперечном сечении детали имеет форму сегмента [5].

На втором этапе в модуле *Static Structural* на основе *ANSYS Mechanical Enterprise* решается 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 ( $q_H > 7,5 \times 10^9 \text{ Вт/м}^2$ ) в тонком поверхностном слое ножа зона обработки может разогреться до температур, превышающих температуру плавления, 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 рис. 4, 5.

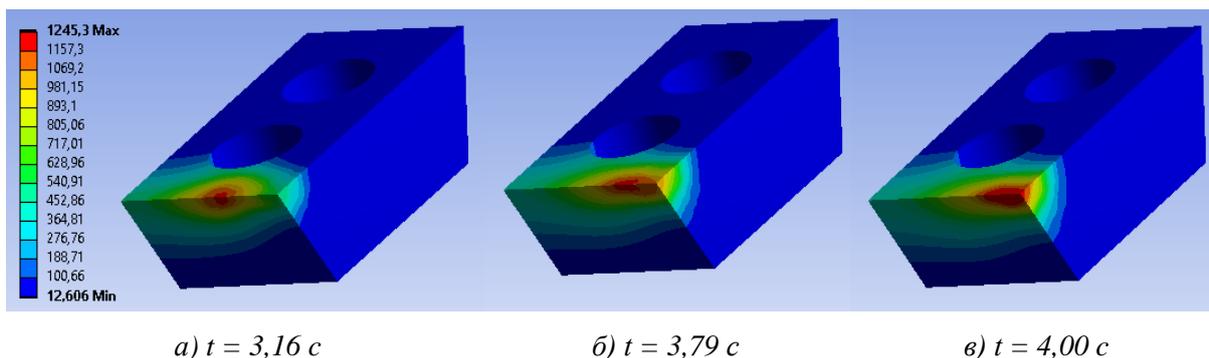


Рис. 3. Распределение полей температур на поверхности модели ножа при скорости движения источника нагрева без оплавления поверхности  
 $V = 10 \text{ мм/с}$ ,  $s = 2,5 \text{ мм}$ ,  $d = 2,5 \text{ мм}$ ,  $q_H = 7 \times 10^9 \text{ Вт/м}^2$

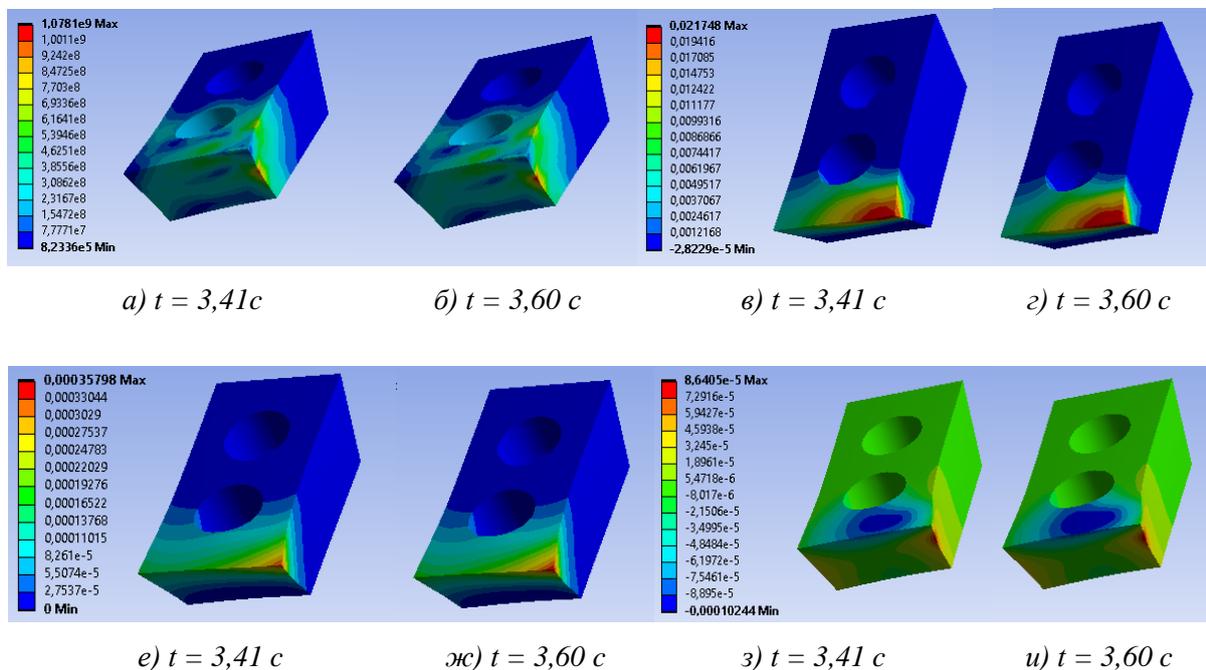


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу (а, б) (МПа), температурных деформаций по оси z (в, г), суммарных перемещений (е, ж) (м) и перемещений вдоль оси z (з, и) (м) в модели ножа при температурном нагружении без оплавления,  
 $v = 11,2 \text{ мм/с}$ ,  $d = 3 \text{ мм}$ ,  $s = 2,5 \text{ мм}$ ,  $q_H = 7 \times 10^9 \text{ Вт/м}^2$

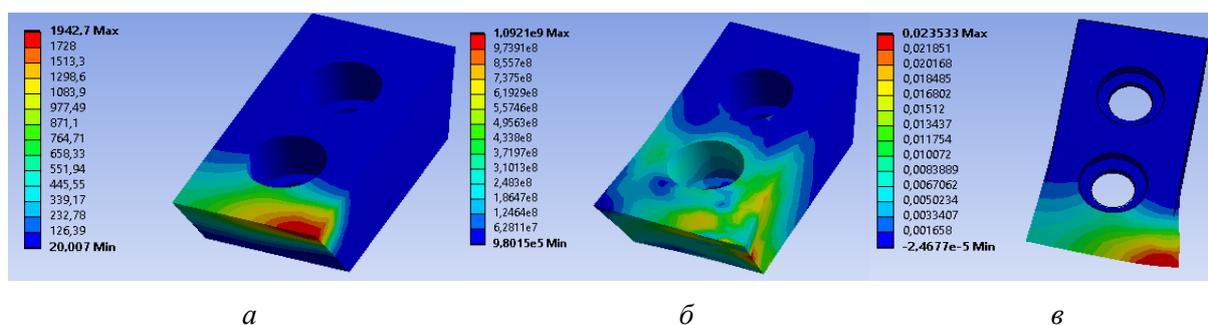


Рис. 5. Температурное поле (а) ( $^{\circ}\text{C}$ ), эквивалентные напряжения по Мизесу (б) (МПа), температурные деформации (в) на поверхности ножа при термообработке с оплавлением в момент времени  $t = 4$  с,  $v = 10$  мм/с,  $s = 2,5$  мм,  $d = 5$  мм,  $q_H = 8,4 \times 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>

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

Для упрочнения рабочих поверхностей деталей была выполнена групповая ППЗ заготовок ножей при помощи плазменной установки. В процессе обработки заготовки устанавливались таким образом, чтобы их режущие кромки располагались на одной линии. Для достижения высокой производительности групповая ППЗ осуществлялась по 40–50 деталей в течение 12–17 минут. Процесс ППЗ проводился в двух вариантах:

- упрочнение без перекрытия зоны влияния плазменной струи (наличие зазора порядка 1,5 мм между упрочненными зонами);
- с перекрытием зоны влияния плазменной струи на 30 %.

В первом варианте было сформировано 4–5 дорожек, во втором 6–7 дорожек. Проведенные эксперименты показали, что срок эксплуатации ножей, упрочненных по второму варианту, на 10 % выше. Это связано с тем, что перекрытие дорожек зоны теплового воздействия плазменной струи существенно повышает трещиностойкость и ударную вязкость деталей, однако при этом несколько снижается износостойкость.

Для ППЗ ножей был принят вариант с 30 % перекрытием зоны влияния плазменной струи. ППЗ ножей производилась при постоянном расстоянии среза сопла плазматрона до поверхности детали  $h = (1,5\text{--}2)$  мм, скорости перемещения плазматрона  $v = 11,2$  мм/с, токе дуги  $I = 26$  А, расходах рабочего газа аргона  $Q_1 = 1,9$  л/мин и защитного газа аргона  $Q_2 = 3,6$  л/мин. При этом достигается существенно большая микротвердость поверхностного слоя 710 HV<sub>0.1</sub> по сравнению с объемной закалкой 450 HV<sub>0.1</sub>. Варьируя технологическими параметрами процесса поверхностного плазменно-дугового упрочнения, можно получить различную шероховатость поверхности с требуемыми характеристиками поверхностного слоя. После плазменной закалки осуществлялась механическая заточка заготовок для образования и формирования на ножах режущей кромки.

Проведены натурные производственные испытания ножей дробильной машины на износостойкость. Для определения степени износа были выбраны две партии по пять деталей, которые соответствовали следующему времени эксплуатации: № 1 – базовая деталь (эталонная); № 2, 3, 4, 5 – после одного, двух, трех и четырех месяцев эксплуатации соответственно.

Сравнительные измерения профиля детали выполнялись на измерительном комплексе 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). По результатам измерений определялась форма детали в формате «igs» и обрабатывалась программой *Solid-Works*, с помощью которой строилась компьютерная модель детали (рис. 6).

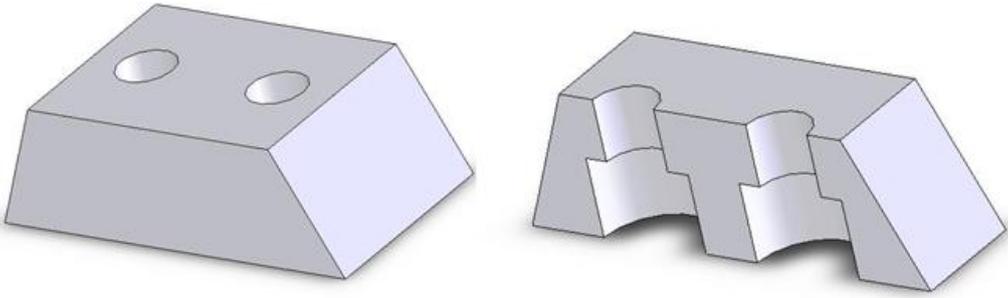


Рис. 6. Компьютерная модель детали

Далее деталь разделялась плоскостями  $A-D$  на части, с выделением плоскости  $T$  исследуемого фрагмента (рис. 7) и на сгенерированных кривых построена поверхность с помощью техники «вытягивания» профилей (рис. 8).

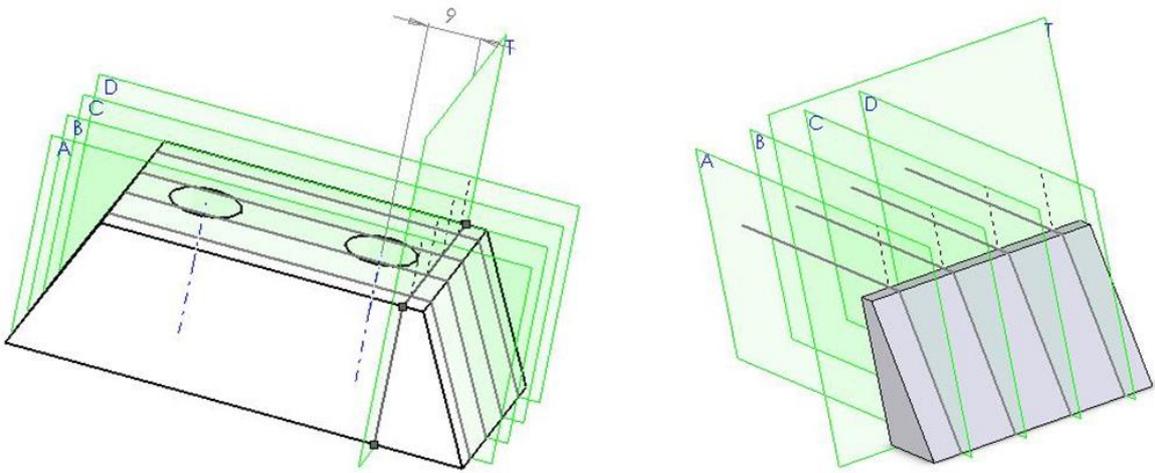


Рис. 7. Положение плоскостей для анализа исследуемого фрагмента

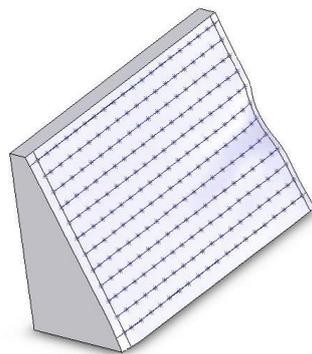


Рис. 8. Поверхность анализируемого фрагмента детали

Основываясь на полученных поверхностях, были построены элементы анализируемых частей детали (рис. 9).

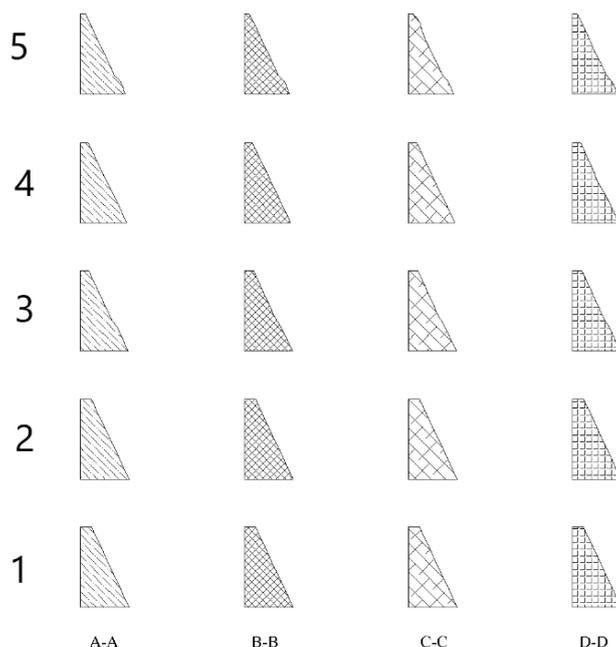


Рис. 9. Плоские элементы деталей 1–5

С помощью программы *AutoCAD* построены плоские элементы соответствующих фрагментов деталей и вычислены поля поверхностей рассматриваемых элементов. Для вычисления параметра износа детали использовалась формула:

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

где  $\Phi_{nm}$  – относительный процент износа детали;

$S_{nm}$  – поле поверхности анализируемого сечения для соответствующей детали  $n$  в соответствии с плоскостью  $m$ ;

$n$  – номер детали ( $n = 1-5$ );

$m$  – наименование соответствующей плоскости ( $m = A - D$ ).

Вычисленные по формуле (2) значения сведены в табл. 2.

Таблица 2 – Относительный износ ножа дробильной машины после объемной и поверхностной плазменной закалки

№ детали	Объемная закалка				Объемная и поверхностная плазменная закалка			
	A	B	C	D	A	B	C	D
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,523	0,373	0,292	0,208	0,515	0,484	0,348	0,222
3	7,329	6,060	5,661	5,153	3,243	2,665	2,142	2,338
4	9,530	9,147	9,313	10,186	4,811	4,711	4,032	4,488
5	17,911	18,154	17,131	18,884	9,710	9,888	9,233	9,953

На основании полученных данных построены графики относительного износа ножей, упроченных объемной и комбинированной закалкой (рис. 10).

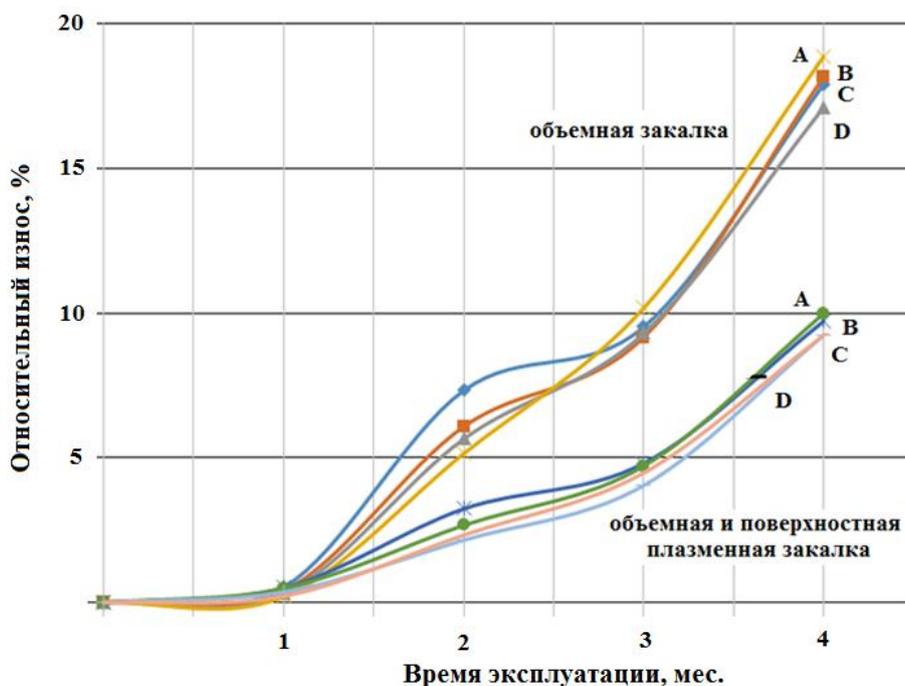


Рис. 10. Графики износа ножей из стали 40X

Экспериментально подтвержден значительный эффект применения ППЗ для дробильного инструмента из стали 40X. Износостойкость ножей дробильной машины при использовании локальной ППЗ увеличена в 2,2 раза по сравнению с объемной закалкой.

Установлено, что при силовом нагружении режущей кромки модели ножа картина распределения эквивалентных напряжений и деформаций отличается от распределения напряжений и деформаций в нетермообработанном инструменте.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Локальная поверхностная плазменная закалка измельчителя древесных отходов / М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич, А. И. Веремейчик, В. В. Батрак, А. Е. Желткович // *Машиностроение и техносфера XXI века : сборник трудов XXVI междунар. научно-техн. конф., Севастополь, 23–29 сентября 2019 г.* – Донецк : ДонНТУ, 2019. – С. 386–389.
2. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н. В. Спиридонов [и др.]; под общ. ред. В. И. Чачина. – Мн. : Вышэйшая школа, 1988. – 155 с.
3. Тюрин, Ю. Н. Плазменные упрочняющие технологии / Ю. Н. Тюрин. – К. : Наукова думка, 2008. – 215 с.
4. Таблицы физических величин. Справочник. / Под ред. И. К. Кикоина. – М. : Атомиздат, 1976. – 1008 с.
5. Плазменно-дуговое упрочнение деталей и инструмента / М. И. Сазонов, А. М. Ессипчук, Е. В. Овчинников, В. М. Хвисевич, С. Р. Онысько, А. И. Веремейчик, М. В. Хеук, К. Т. Аббасов // *Новые технологии и материалы, автоматизация производства : сб. ст. межд. науч.-техн. конф., Брест, 29–30 сентября 2021 г.* / УО «Брест. гос. техн. ун-т»; редкол.: С. Р. Онысько [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2021. – С. 138–145.

*Поступила 03.01.2022*