

3. Технология машиностроения (специальная часть): учебник для машиностроительных специальностей вузов / А. А. Гусев [и др.] – М. : Машиностроение, 1986. – 480 с.

4. Балакшин, В. С. Основы технологии машиностроения / В. С. Балакшин. – М. : Машиностроение, 1969. – 358 с.

УДК 004.94:539.3

*Сосновский А. А., Ярмак М. А.*

*Научные руководители: к. ф.-м. н., доцент Веремейчик А. И.;*

*к. т. н., доцент Хвисевич В. М.*

## **К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЛОКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ НОЖА ЛИСТОВЫХ ГИЛЬОТИННЫХ НОЖНИЦ АКНА-3225**

В реальных условиях работы элементы кузнечно-прессового оборудования подвергаются воздействиям агрессивной среды, механическим усилиям (центробежные силы, силы трения и т.д.). Для повышения надежности и долговечности таких деталей используются различные методы. Термическое упрочнение является одним из наиболее эффективных способов увеличения ресурса их работы, а также снижения материалоемкости [1]. Из всех способов такой термообработки можно выделить поверхностную закалку деталей при помощи движущейся плазменной струи (дуги) [1–3]. В отличие от традиционных способов термообработки воздействие концентрированной плазменной струи включает одновременное тепловое, механическое и радиационное воздействие [4]. Суть поверхностного плазменного упрочнения состоит в быстром нагреве поверхности металла до аустенитного состояния и интенсивном охлаждении с целью получения высокой твердости, износостойкости и прочности приповерхностного слоя в сочетании с вязкой сердцевиной самого тела. Такое упрочнение реализуется путем локальной закалки с помощью быстро перемещающегося высокоинтенсивного концентрированного источника тепла (плазменной струи), генерируемой плазмотроном постоянного тока мощностью до 1,5 кВт и характеризуется рядом преимуществ:

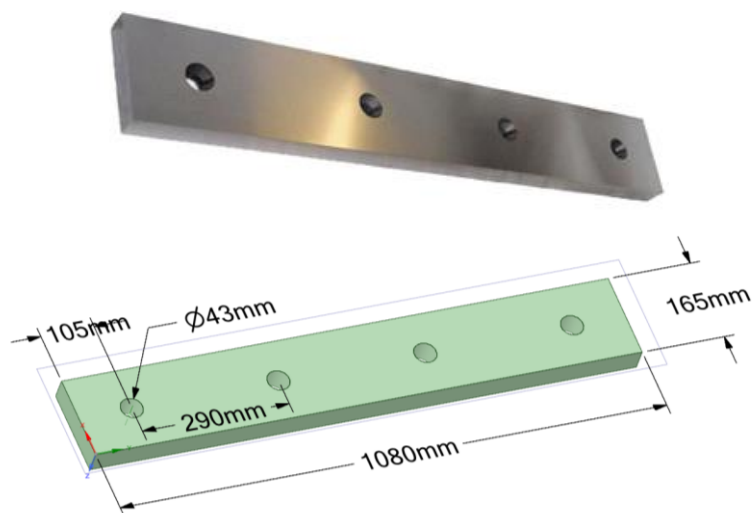
- достаточно малой глубиной закалки до 0,3–0,7 мм и лишь в местах износа;
- твердость и износостойкость поверхностного слоя ножа значительно выше, чем при объемной закалке;
- отсутствие термических деформаций благодаря локальности и кратковременности взаимодействия струи плазмы с поверхностью металла [5].

После распространения температурного поля в глубину детали на поверхности появляются сжимающие остаточные напряжения, которые могут достигать значительных величин. 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 дорогостоящего оборудования для такого рода исследований требует 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 такого рода задач по исследованию напряженно-деформированного состояния тел, оценке прочностных характеристик и прогнозирования долговечности конструкций. Программная система конечно-элементного анализа ANSYS является одной из наиболее эффективных CAE-систем. Программное обеспечение ANSYS со специальным интерфейсом ANSYS Workbench позволяет успешно решать различные задачи механики деформируемого твердого тела, теплофизики и т. д. [5].

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 с помощью модуля управления материалами, представленном в ANSYS Workbench элементом Engineering Data, входящим в структуру блока инженерного анализа.

Решение нестационарной задачи термоупругости на базе ANSYS Mechanical Enterprise проводится в два этапа. На первом этапе в модуле Transient Thermal проводится анализ температурного поля на основе решения задачи нестационарной теплопроводности. Проведено исследование теплового поля в теле ножа размерами  $1080 \times 165 \times 45$  мм, изготовленного из молотовых поковок инструментальной, легированной стали 6ХВ2С ГОСТ 5950 при различных режимах теплового нагружения. Высокостойкие ножи (рисунок 1) являются режущим элементом автоматизированного комплекса для резки листов АКНА-3225, которые используются для рубки черного и цветного листового проката толщиной от 0.1 до 35 мм. Химический состав стали приведен в таблице 1.



*Рисунок 1 – Нож*

Таблица 1 – Химический состав стали 6ХВ2С в %

Ca	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	W	Cu	Fe
0,55...0,65	0,5...0,8	0,15...0,4	до 0,35	до 0,03	до 0,03	1...1,3	до 0,3	2,2...2,7	до 0,3	~93

При нагреве поверхности металла плазменной струей осуществляется за счет конвективного и лучистого теплообмена. Конвективный нагрев поверхности обусловлен переносом энергии плазменной струи под действием теплопроводности, диффузии, и его доля составляет 90–95 % от общего баланса энергии. Плотность конвективного теплового потока определяется из выражения:

$$q = \alpha \cdot (T_{nl} - T_{нов}), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи ( $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ ), который выражается через критериальные зависимости (число Рейнольдса, Нуссельта, Прандтля и т. д.);

$T_{nl}$  – температура плазменной струи на внешней границе пограничного слоя ( $К$ );

$T_{нов}$  – температура поверхности ножа ( $К$ ). Распределение теплового потока в пятне нагрева описывается законом нормального распределения Гаусса.

Исследование теплового потока на поверхности ножа при воздействии плазменной струи проводилось по известным параметрам процесса плазменной закалки в соответствии с разработанной методикой. При мощности плазмотрона  $N = 1 \text{ кВт}$  с КПД, равным 0,8, отношении расстояния от среза сопла до термообрабатываемой поверхности к диаметру сопла  $\frac{h}{d} = 2$ , массовом расходе га-

за  $G = 0,002 \frac{кг}{с}$  и температуре газа на выходе из сопла  $T = 5000 \text{ К}$ , с использованием уравнения Менделеева-Клапейрона определена плотность газа, составившая  $\rho = 0,1 \frac{кг}{м^3}$ , а также скорость потока на срезе сопла плазмотрона  $v_0 = 1500$  м/с. При данных условиях эксперимента плотность теплового потока на поверхности детали составила  $q = 7 \cdot 10^6 \frac{Вт}{м^2}$ .

Конечно-элементная модель ножа показана на рисунке 2.

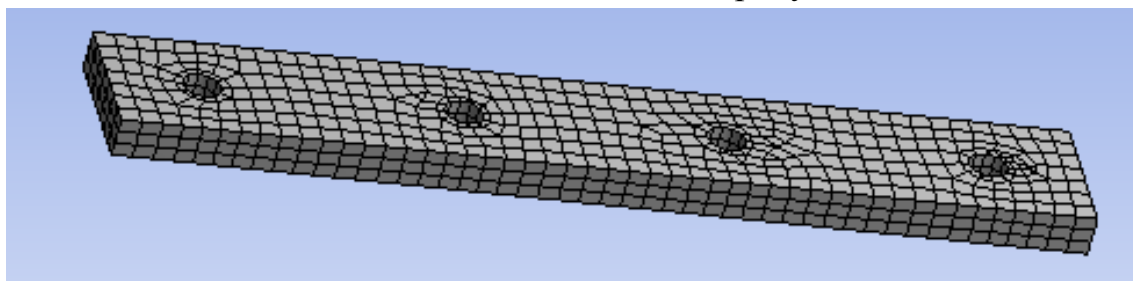


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель ножа

Для моделирования распространения температуры вглубь ножа используется макрос для ANSYS Mechanical на языке программирования APDL [5], в котором задаются характеристики тепловой нагрузки, скорость движения источника нагре-

ва, координаты его начального положения, время движения и др. В соответствии со скоростью движения плазменной струи к узлам конечно-элементной модели вдоль режущего лезвия пошагово прикладывалась температурная нагрузка. Распределение теплового потока в пятне нагрева задавалось зависимостью:

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

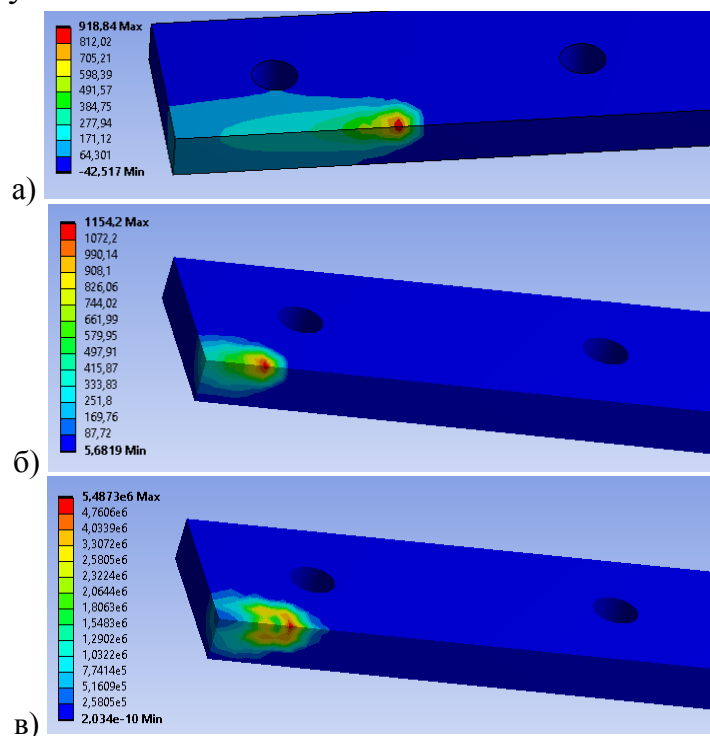
где  $q_H$  – плотность теплового потока на поверхности ( $\frac{Вт}{м^2}$ );

$r_H$  – радиус пятна нагрева ( $м$ );

$x, y$  – координаты центра пятна нагрева ( $м$ );

$v$  – скорость движения источника тепла ( $м/с$ ).

Начальная температура принималась равной  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На поверхностях модели ножа задавалась конвекция с различными коэффициентами теплоотдачи  $\alpha = (5-30) \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ . Расстояние от центра пятна нагрева до вершины инструмента составляло  $2-4\text{ мм}$  и в процессе перемещения источника тепла не менялось. Численный эксперимент проводился при диаметрах пятна нагрева  $d = (2-5)\text{ мм}$  и скоростях движения источника тепла  $v = (2-20)\text{ мм/с}$ . В результате теоретических исследований модели в широком диапазоне параметров было получено решение задачи нестационарной теплопроводности. Некоторые результаты приведены на рисунке 3.

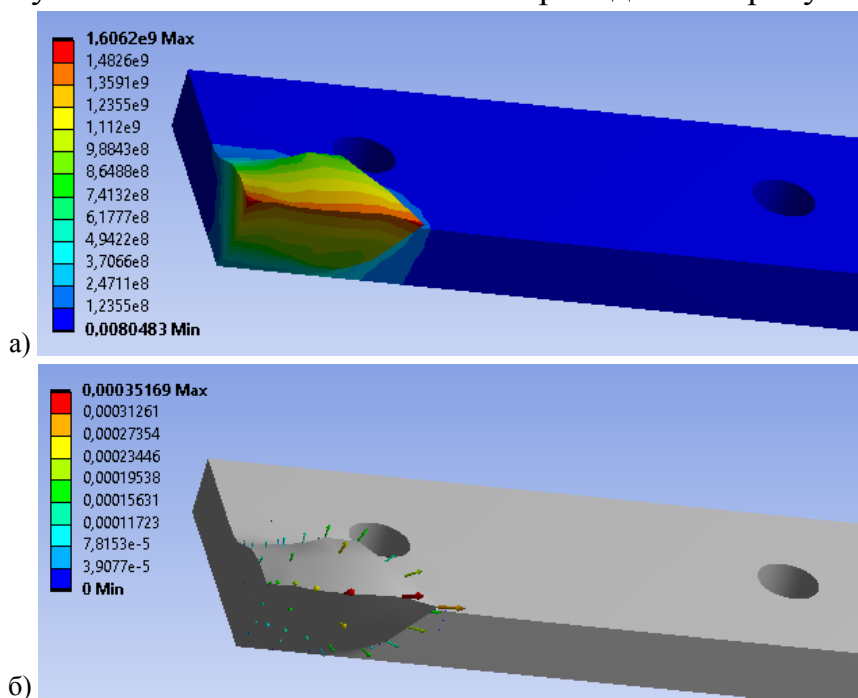


а)  $V = 15\text{ мм/с}, t = 42,1\text{ с}$

б, в)  $V = 5\text{ мм/с}, t = 10\text{ с}$

Рисунок 3 – Распределение поля температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) (а, б) и теплового потока ( $\frac{Вт}{м^2}$ ) (в) на поверхности ножа, диаметр пятна нагрева  $d = 3\text{ мм}$ ,  $q_H = 7 \cdot 10^6\text{ Вт/м}^2$

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. При определении напряжений и деформаций нож закреплялся по нижней плоскости для ограничения перемещения в направлении, перпендикулярном направлению движения струи, и по отверстиям. Полученные ранее результаты теплового анализа сохраняются в отдельном файле и используются в качестве внешней нагрузки при решении термоупругой задачи. Некоторые результаты статического анализа приведены на рисунке 4.



**Рисунок 4 – Типичное распределение эквивалентных напряжений по Мизесу (а) (Па) и векторное поле перемещений (б) (м) в конечно-элементной модели ножа при температурном нагружении  $V = 10$  мм/с,  $d = 3$  мм,  $q_H = 7 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>**

Полученные результаты нестационарного теплового и статического анализа использованы для определения оптимальных режимов работы плазмотрона.

#### Список цитированных источников

1. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н. В. Спиридонов [и др.]; под общ. ред. В. И. Чачина. – Минск: Вышэйшая школа, 1988. – 155 с.
2. Тюрин, Ю. Н. Плазменные упрочняющие технологии / Ю. Н. Тюрин. – К. : Наукова думка, 2008. – 215 с.
3. Плазменное поверхностное упрочнение / Л. К. Лещинский [и др.]; под общ. ред. Л. К. Лещинского. – Киев : Тэхніка, 1990. – 109 с.
4. Крауз, В. И. Энциклопедия низкотемпературной плазмы / В. И. Крауз, Ф. Симоне, Д. Моуренас; гл. ред. В. Е. Фортов. Сер. Б “Справочные приложения, базы и банки данных”. Тематический том IX-3. Радиационная плазмодинамика. – 2007. – 541 с.
5. Веремейчик, А. И. Исследование температурного поля и НДС ножей дробильной машины при поверхностном плазменном упрочнении / А. И. Веремейчик, В. М. Хвисевич, М. И. Сазонов // Механика. Исследования и инновации / Белорус. гос. ун-т транспорта. – Гомель, 2021. – Вып. 14. – С. 29–40.