

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ В НОЖЕ ГИЛЬОТИННЫХ НОЖНИЦ ПРИ ДЕЙСТВИИ ДВИЖУЩЕГОСЯ НОРМАЛЬНО-КРУГОВОГО ИСТОЧНИКА НАГРЕВА

*Веремейчик А. И., Хвисевич В. М., Холодарь Б. Г.
Брестский государственный технический университет
г. Брест, Республика Беларусь*

В реальных условиях работы элементы кузнечно-прессового оборудования подвергаются воздействиям агрессивной среды, механическим усилиям. Для повышения надежности и долговечности таких деталей используются различные методы. Анализ литературных источников и ряд проведенных экспериментов позволяют выделить из существующих способов термообработки поверхностную закалку с помощью плазменной струи, применение которой позволяет реализовать процесс упрочнения детали на заданную глубину, сохраняя сердцевину с исходными свойствами.

При плазменном поверхностном упрочнении используется действие движущихся концентрированных источников энергии, создающих направленную высокотемпературную газовую струю, тепловой поток которой и является главным действующим фактором процесса. Поверхностная закалка стальной детали связана с изменением фазовой структуры материала и созданием в нем мартенситной структуры с мелким размером зерна. Для обеспечения этого процесса производится нагрев материала до температур, превышающих температуру точки фазового превращения, определяемой содержанием углерода и других компонентов сплава, с последующим быстрым охлаждением. Скорость процесса охлаждения является фактором, существенно влияющим на результат термообработки, – ее увеличение способствует созданию более дисперсной мелкозернистой структуры материала, и, соответственно, более мелких по размерам дефектов и более высоких показателей твердости и износостойкости [1, 2]. В связи с наличием движения струи вдоль поверхности обрабатываемой детали величина достигаемой температуры разогрева материала и величина скорости охлаждения его после прохода струи оказываются жестко связанными, особенно в случае, когда дополнительные мероприятия по интенсификации процесса охлаждения не предпринимаются. Процессы нагрева и охлаждения зависят от интенсивности теплового потока q , коэффициентов теплопроводности λ материала и скорости движения плазмотрона V . Так как имеют место большие градиенты температур по пространственным координатам обрабатываемой детали, теплофизические коэффициенты материала оказываются переменными и в связи с большими сложностями учета подобного рода обстоятельств используются осредненные значения этих параметров, принимаемые по результатам обработки расчетных и экспериментальных данных. В [1] указано, например, что величины упомянутых параметров при обработке стали следует принимать соответствующими температуре $T \approx 900^\circ\text{C}$.

Для определения оптимальных режимов процесса поверхностной плазменной заправки проведено исследование теплового поля в теле ножа размерами 1080×165×45 мм (рисунок 1) из стали 6ХВ2С при различных режимах теплового нагружения. Нож является режущим элементом автоматизированного комплекса для резки листов АКНА-3225.

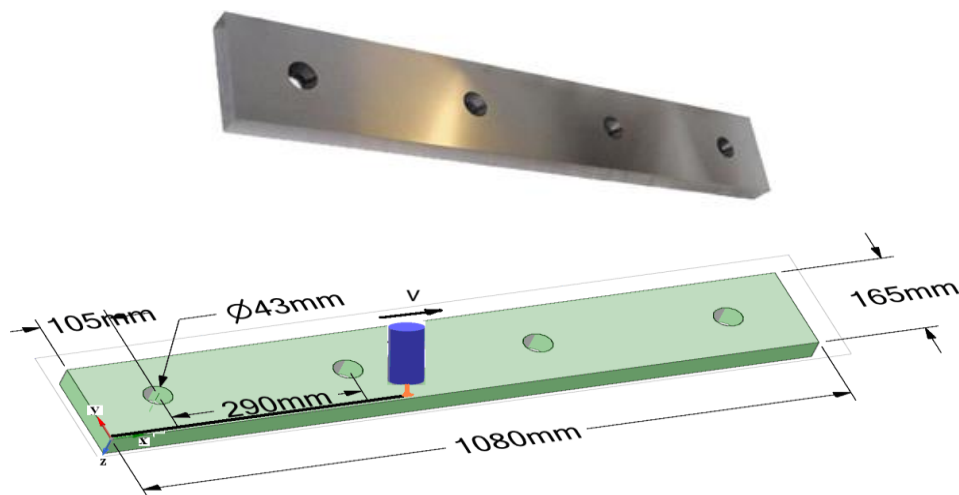


Рисунок 1 – Нож гильотины АКНА-3225

Для описания поля температур в ноже при нагреве его струей плазмы используется линейное уравнение теплопроводности с граничным условием второго рода. Рассматривается задача в пространственной постановке для теплового потока в форме пятна с интенсивностью, распределенной по нормальному закону. Интенсивность потока во времени принимается постоянной.

В определенных случаях, в частности, на начальных фазах нагрева, когда можно принять, что радиус пятна $r_f \ll (at)^{1/2}$ в точках, близких к оси потока, можно использовать одномерные решения, описывающие распределение температуры в зависимости от времени t и глубины z расположения точки под нагружаемой тепловым потоком поверхностью. В этом случае для температуры $T(z,t)$ имеет место зависимость [1]:

$$T(z,t) = 2q_0 \frac{\sqrt{at}}{\lambda} \text{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right), \quad (1)$$

где $\text{ierfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-x^2) - x \cdot \text{erfc}(x)$ – интеграл от функции интеграла вероятности, $\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x)$, $\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-\xi^2) d\xi$ – функция ошибок [3].

Эффективная толщина зоны теплового влияния составляет примерно $\frac{z}{2\sqrt{at}}$

$\approx 1,6$, где $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – коэффициент температуропроводности, c – удельная теплоемкость. Предельная температура в центре пятна нагрева составит:

$$T(0,0,\infty) = \frac{q_0 r_f}{\lambda}. \quad (2)$$

Для источника с гауссовым распределением $q(r) = q_0 \exp(-kr^2)$ в случае, когда не имеет еще места расплавление материала, температура в центральной точке не превысит значения

$$T(0,0,\infty) = \frac{P_0}{2\lambda} \sqrt{k/\pi} = \frac{q_0}{2\lambda} \sqrt{\pi/k}, \quad (3)$$

где $P_0 = q_0 \frac{\pi}{k}$ – эффективная мощность источника тепла, $k = \frac{1}{(r_f)^2}$ – коэффициент сосредоточенности потока.

Для движущегося с постоянной скоростью V источника тепла температура в центральной точке пятна нагрева в подвижной системе координат определяется по формуле

$$T(0,0,t) = \frac{P_0}{\lambda \pi \sqrt{\frac{\pi}{k}}} \operatorname{arctg} \left(\frac{t}{4ak} \right). \quad (4)$$

При этом в соответствии с (4) температура вначале растет пропорционально корню квадратному по времени, а после некоторого периода времени, зависящего от теплофизических свойств материала, устанавливается квазистационарное состояние, при котором нагретая зона материала перемещается вслед за источником. При этом формула (4) сохраняет свою роль – температура в точках тела не может превысить указанного значения.

Уровень критической интенсивности плотности потока q_0^{nl} , требуемого для достижения на поверхности материала температуры плавления T_{nl} :

$$q_0^{nl} = 1,128 \lambda T_{nl} \sqrt{k}. \quad (5)$$

Уравнение для расчета температуры в точке тела от действия перемещающегося с постоянной скоростью V нормально-кругового источника теплоты в подвижной системе координат имеет вид [1]:

$$T(x, y, z, t) = \left[2P_0 \exp\left(-\frac{Vx}{a}\right) \left(c\gamma(4\pi a)^{3/2}\right) \right] \times \int_0^t \frac{1}{\sqrt{\xi}(t_0 + \xi)} \exp\left[-\frac{z^2}{4a\xi} - \frac{r^2}{4a(t_0 + \xi)} - \frac{V^2(t_0 + \xi)}{4a}\right] d\xi, \quad (6)$$

где $t_0 = \frac{1}{4ak}$ – постоянная времени.

С использованием приведенных выше зависимостей разработана программа на языке FORTRAN, которая позволяет определять температуру в полупространстве (обрабатываемой детали) при воздействии подвижным тепловым потоком налицевую поверхность. В качестве исходных данных задаются ток дуги I , напряжение дуги U , коэффициент полезного действия η плазмотрона, радиус пятна нагрева поверхности r_f , время конца расчета, глубина и радиус проникно-

вения тепла, скорость движения источника нагрева, а также характеристики материала ножа (коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, плотность, температура плавления). Исходное положение центра пятна нагрева вдоль оси движения Ox задается в точке с координатой $x=r_f$.

В широком диапазоне параметров обработки ($I = 10\text{--}35$ А, $U = 8\text{--}28$ В, $V = 0,1\text{--}20$ см/с, $r_f = 0,05\text{--}0,4$ см) проведен расчет температурных полей в ноже при действии движущегося нормально-кругового источника теплоты (плазменной струи). Расчет проводился в центре пятна нагрева по глубине z , на поверхности вдоль оси y , а также по оси z в плоскостях, параллельных координатной xOz . Типичные зависимости температурного поля от времени при $I = 35$ А,

$U = 25$ В, $\eta = 0,72$, $r_f = 0,1$ см, $T_{nl} = 1550^\circ\text{C}$, $\rho = 7860 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $\lambda = 38 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$,

$c = 745 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ приведены на рисунках 2–4.

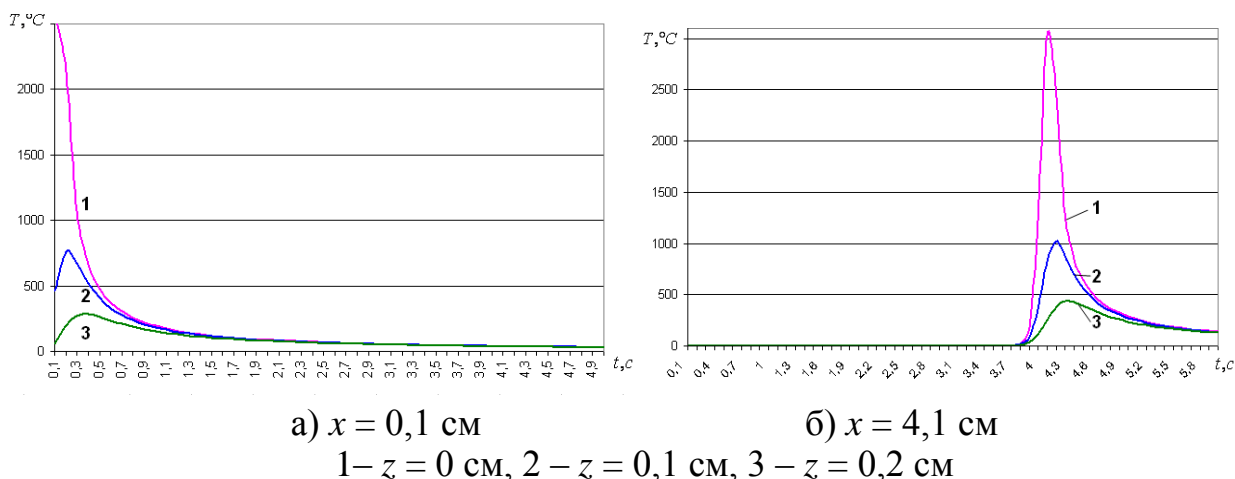


Рисунок 2 – Зависимость температурного поля от времени в плоскости движения оси источника нагрева на различной глубине при $V = 1$ см/с

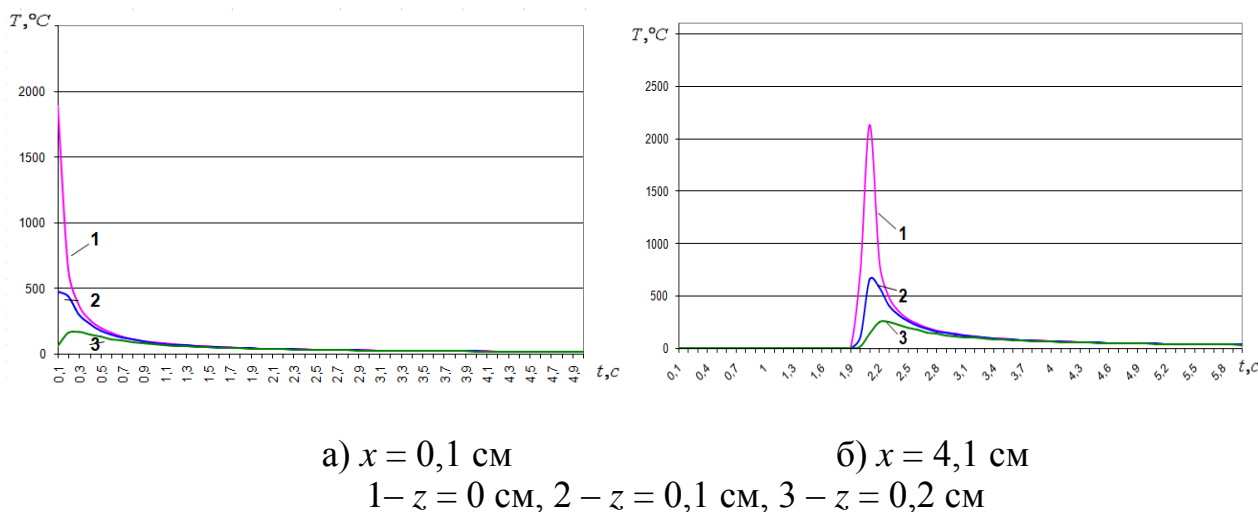
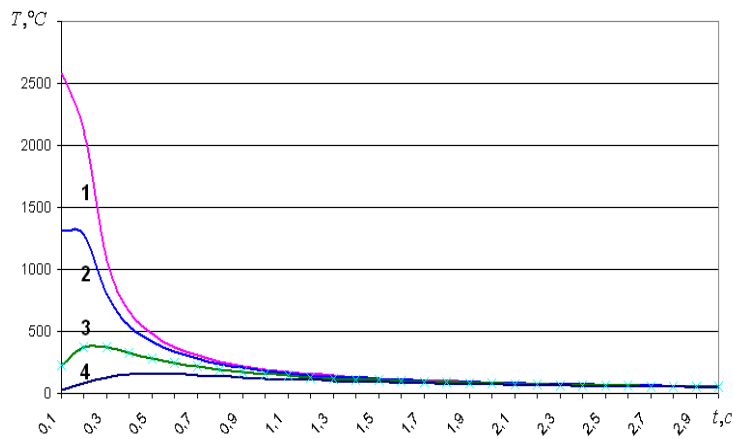
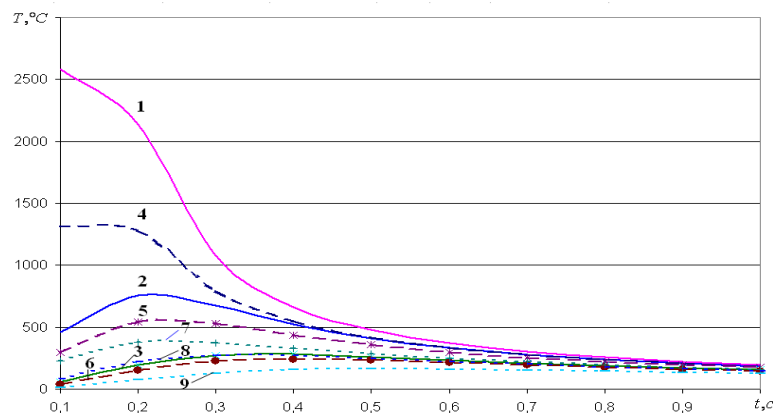


Рисунок 2 – Зависимость температурного поля от времени в плоскости движения оси источника нагрева на различной глубине при $V = 2$ см/с



1 – $y = 0$ см, 2 – $y = 0,1$ см, 3 – $y = 0,2$ см, 4 – $y = 0,3$ см

Рисунок 3 – Зависимость температурного поля от времени на поверхности ножа в направлении оси y на различных расстояниях от траектории движения центра пятна нагрева, $x = 0,1$ см, $V = 1$ см/с



$y = 0$ см: 1 – $z = 0$ см, 2 – $z = 0,1$ см, 3 – $z = 0,2$ см;
 $y = 0,1$ см: 4 – $z = 0$ см, 5 – $z = 0,1$ см, 6 – $z = 0,2$ см;
 $y = 0,2$ см: 7 – $z = 0$ см, 8 – $z = 0,1$ см, 9 – $z = 0,2$ см

Рисунок 4 – Зависимость температуры от времени по оси Oz в плоскостях, параллельных координатной плоскости xOz , $x = 0,1$ см, $V = 1$ см/с

Из рисунка 2 видно, что максимальная температура в точке с координатой $x = 4,1$ см при скорости движения источника нагрева 1 см/с возникает в момент времени $t = 4,3$ с, т. е. точка с максимальной температурой отстает от центра пятна.

С помощью системы компьютерной алгебры MathCAD построены поверхности и линии уровня температуры для различных моментов времени в различных плоскостях. Типичные изотермы для координаты $x = 4,1$ см при $V = 1$ см/с, $r_f = 0,1$ см приведены на рисунке 5.

Результаты исследований показывают, что температуры в точках отрицательной части оси x (позади центра пятна нагрева) выше, чем в точках, расположенных перед плазмотроном, и максимумы температур в них достигаются в разное время.

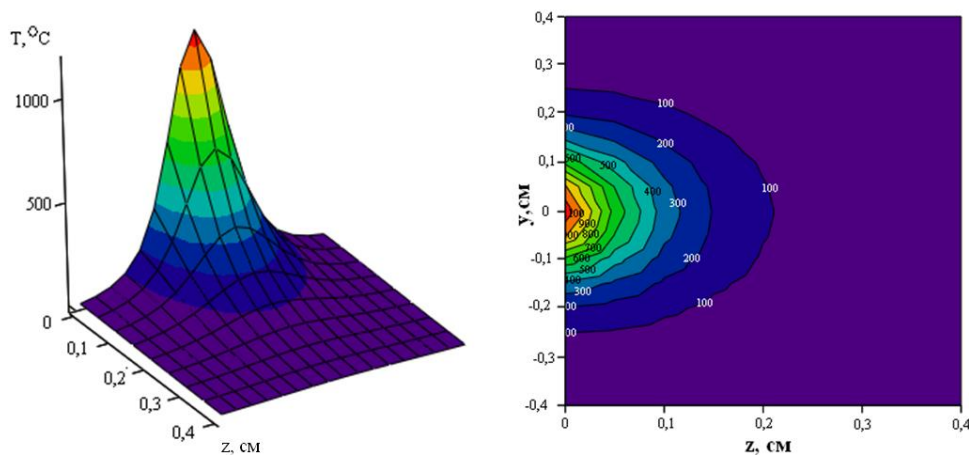


Рисунок 5 – Поверхность температуры и уровни температуры (изотермы) для сечения, перпендикулярного оси Ox , при $t = 4$ с

Основываясь на данных по техническим характеристикам плазмотрона, теплофизическим и механическим свойствам обрабатываемых материалов и их прогнозируемым структурным параметрам после теплового воздействия, с использованием полученных результатов могут быть назначены конкретные режимы термообработки с последующим их уточнением в процессе технологических экспериментов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н. Н. Рыкалин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М.: ГНТИ машиностроительной литературы, 1951. – 296 с.
3. Карлслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карлслоу, Д. Эгер. – М. : Наука, 1964. – 487 с.

УДК678:661.66:620.1

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ФОТОПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

**Овчинников Е. В.¹, Хвисевич В. М.², Эйсымонт Е. И.¹, Веремейчик А. И.²,
Возняковский А. А.³**

1) Гродненский государственный университет им. Янки Купалы,
г. Гродно, Республика Беларусь

2) Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь

3) Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Смачивание поверхностей твердых материалов вызывает огромный интерес со стороны фундаментальных и прикладных отраслей научной деятельности. Явление смачивания играет важную роль во многих промышленных процессах,