

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В НОЖЕ ГИЛЬОТИННЫХ НОЖНИЦ ПРИ ДЕЙСТВИИ ДВИЖУЩЕГОСЯ ЛОКАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА НАГРЕВА

к.ф.-м.н. Веремейчик А. И., к.т.н. Хвисевич В. М., к.т.н. Холодарь Б. Г.

Брестский государственный технический университет, Брест

Введение. 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. Плазменное упрочнение по технико-экономическим показателям является более перспективным способом по сравнению с лазерным и электронно-лучевыми технологиями упрочнения [1].

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 деталей 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 [2; 3]. 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 , характеристик материала и скорости движения источника нагрева 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. Согласно [1], величины упомянутых параметров при обработке стали следует принимать соответствующими температуре $T \approx 900^\circ\text{C}$.

В основе поверхностного плазменного упрочнения металлов лежит способность плазменной струи (дуги) создавать на небольшом участке поверхности высокие плотности теплового потока, достаточные для нагрева, плавления или испарения практически любого металла. Основной физической характеристикой плазменного воздействия является температурное поле, уровень и форма которого дают возможность оценить температуру в точках тела (в разные моменты времени), скорость нагрева и охлаждения, а в конечном итоге структурное состояние и фазовый состав поверхностного слоя

материала [4]. В научно-технической литературе известны решения тепловых задач, посвященных определению пространственно-временных распределений температуры, создаваемых стационарными или движущимися источниками тепла. В зависимости от требуемых условий источники тепла могут быть распределенными по всей нагружаемой поверхности тела либо сосредоточенными на ее ограниченном участке. В последнем случае речь может идти о форме пятна нагрева и о законе распределения теплового воздействия по этому пятну. В классической теории теплопроводности получены аналитические решения многих наиболее важных для практики задач [5–9]. Например, в [7] рассматривается аналитическое решение задачи теплопроводности в среде, подверженной воздействию движущегося источника тепла. С использованием рядов Фурье оценивается распределение температуры вокруг источника прямоугольной формы, движущегося с постоянной скоростью вдоль оси стержня. Наиболее интересным результатом теории является вывод единой формулы, способной предсказывать время охлаждения и скорость охлаждения с довольно хорошей точностью для рассмотренных диапазонов температур. В [8] выполнен анализ распределения температуры по поверхности заготовки при воздействии движущегося источника тепла в процессе плазменно-дуговой резки. Статья [9] посвящена эффективному численному исследованию двумерных задач теплопроводности материала, подвергаемого воздействию нескольких движущихся гауссовых точечных источников тепла, располагающихся внутри материала и движущимися по некоторым заданным прямым линиям или кривым с зависящими от времени скоростями. Разработан эффективный метод подвижной сетки, который непрерывно корректирует двумерную сетку на основании уравнения в частных производных для одномерной подвижной сетки с соответствующей функцией контроля температурного поля. Затем задача теплопроводности решается на этой адаптивной подвижной сетке.

При плазменной обработке поверхности с целью поверхностного упрочнения детали важную роль играет также время нагружения, т. к. в интересующем возможном диапазоне интенсивностей теплового воздействия и требований к достижению температур, значительно не превышающих температур плавления материала, с одной стороны, но достаточных для прохождения фазовых превращений и требуемой трансформации структуры материала, с другой, глубина проникновения тепла внутрь тела и соответственно возникающая зона теплового воздействия измеряется долями миллиметра. Поэтому фактическая толщина детали большой роли не играет и может рассматриваться как бесконечная. Аналогичный геометрический порядок зона теплового воздействия имеет и в направлении вдоль поверхности, поэтому для решения задач наиболее удобным методом является использование функций Грина (метод мгновенно-приложенного точечного источника) при соответствующем интегрировании воздействия по площади пятна нагрева. В статье использован именно этот способ в соответствии с литературой [1–3].

1. Постановка задачи. Математическая модель задачи теплопроводности. Для определения оптимальных режимов процесса поверхностной плазменной закалки проведено исследование теплового поля в теле ножа размерами 540×60×16 мм (рисунок 1) из стали 6ХВ2С при различных режимах теплового нагружения. Нож является режущим элементом гильотинных ножниц с наклонным ножом для листового металла НК3416.

Для описания поля температур в ноже при нагреве его струей плазмы используется линейное краевое уравнение теплопроводности с граничным условием второго рода [5]. Рассматривается задача в пространственной постановке для теплового потока в форме кругового пятна с интенсивностью, распределенной по нормальному закону:

$$q(r) = q_0 \exp(-kr^2), \quad (1)$$

где r – радиус сечения струи (сопла плазмотрона); k – коэффициент сосредоточенности потока, характеризующий концентрацию энергии в пятне нагрева, определяется по формуле через радиус пятна нагрева r_f :

$$k = \frac{1}{(r_f)^2}. \quad (2)$$

Интенсивность потока во времени принимается постоянной.

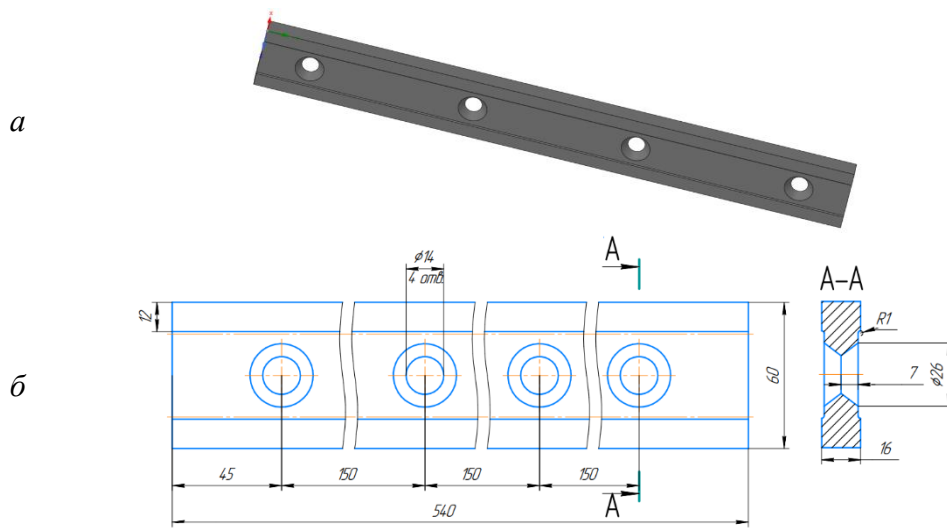


Рис. 1. Нож гильотины: *а* – внешний вид; *б* – чертеж

Уравнение для расчета температуры в точке тела от действия перемещающегося с постоянной скоростью V нормально-кругового источника теплоты в подвижной системе координат имеет вид [2]:

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

где $P_0 = q_0 \frac{\pi}{k}$ – эффективная мощность источника тепла; q_0 – плотность теплового потока; $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности материала; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность материала; $t_0 = \frac{1}{4ak}$ – постоянная времени; t – время; z – координата вдоль оси воздействия; ξ – переменная интегрирования.

Полагая в (3) $x = y = z = 0$, получим температуру в центре пятна нагрева:

$$T(0,0,0,t) = \frac{P_0}{2\lambda\sqrt{4\pi a t_0}} \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{t}{t_0}}. \quad (4)$$

В соответствии с (4), в начальный момент нагрева ($t \ll t_0$), $\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{t}{t_0}} \approx \sqrt{\frac{t}{t_0}}$ и $T = \frac{P_0}{\pi\lambda t_0 \sqrt{4\pi a}} \sqrt{t}$, т. е. температура растет пропорционально \sqrt{t} . Далее ее рост замедляется, устанавливается квазистационарное состояние, и температура приближается к значению температуры предельного состояния, при которой не наблюдается расплавление материала:

$$T_{np} = T(0,0,0,\infty) = \frac{P_0}{2\lambda} \sqrt{\frac{k}{\pi}} = \frac{q_0}{2\lambda} \sqrt{\frac{\pi}{k}}. \quad (5)$$

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

$$T(0,0,0,t) = \frac{P_0}{\lambda} \sqrt{\frac{k}{\pi^3}} \operatorname{arctg}(4akt). \quad (6)$$

Отметим, что после некоторого периода времени наступления квазистационарного состояния, зависящего от теплофизических свойств материала, нагретая зона материала начинает перемещаться вслед за источником, однако температура в точках тела не может превысить значения T_{np} , определяемого по формуле (5).

Критическая плотность потока $q_0^{пл}$ и время τ достижения на поверхности тела температуры плавления $T^{пл}$:

$$q_0^{пл} = 2\lambda T^{пл} \frac{\sqrt{k}}{\sqrt{\pi}} = 1,128\lambda T^{пл} \sqrt{k}, \quad \tau = 0,79 \frac{(\lambda(T^{пл})^2)}{q_0^2 a}. \quad (7)$$

Время τ возрастает с ростом температуры плавления, теплопроводности, удельной теплоемкости и уменьшается при росте плотности теплового потока.

Величина теплового потока плазмотрона вычисляется по формуле:

$$Q = U \cdot I \cdot \eta, \quad (8)$$

где I – ток дуги, U – напряжение дуги, η – коэффициент полезного действия плазмотрона.

При выборе величины r_f использовался следующий подход. Распределение интенсивности нормально-кругового потока по радиусу r сечения струи описывается выражением $q(r) = q_m \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right)$, где r_0 – некоторый характерный радиус поперечного сечения струи; q_m – максимальная интенсивность потока. Отсюда видно, что при $r = r_0$

интенсивность потока падает в e раз и составляет $1/e = 0,368$ от своего значения на оси струи. Если при расчетах температуры принимать во внимание только поток, ограниченный зоной $0 < r < r_0$, то значительная часть его энергии окажется неучтенной. Поэтому поток ограничивают некоторой цилиндрической поверхностью радиуса r_f , пренебрегая энергией отсеченной части струи. Величина исходящего из сопла радиуса R равномерного потока струи равна $Q = q_m \cdot \pi R^2$, нормально-кругового потока $Q = q_m \int_0^{r_f} \exp\left(-\left(\frac{r}{R}\right)^2\right) \cdot 2\pi r dr = Q_0 \left(1 - \exp\left(-\left(\frac{r_f}{R}\right)^2\right)\right)$. График функции $\exp\left(-\left(\frac{r}{R}\right)^2\right)$ показан на рисунке 2.

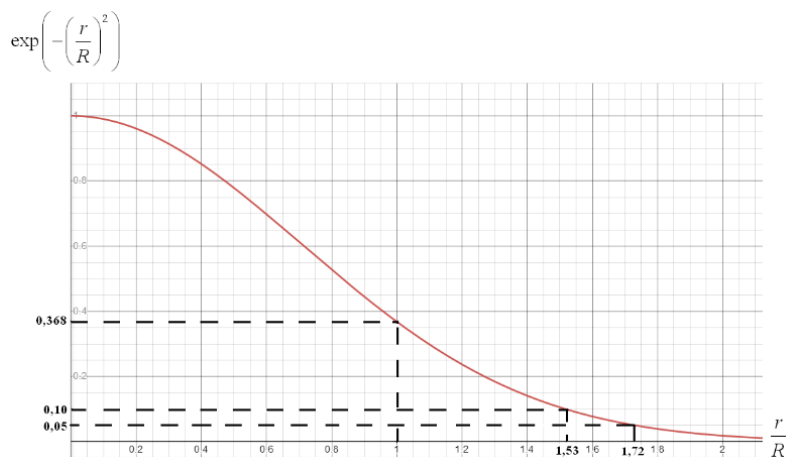


Рис. 2. Зависимость функции $\exp\left(-\left(\frac{r}{R}\right)^2\right)$ от соотношения $\frac{r}{R}$

Задавшись для отсекаемого участка потока уровнями $Q = 0,05Q_0$ или $Q = 0,1Q_0$ (по [1; 2]), определяем соответствующие им граничные радиусы $r_f = 1,73R$ или $r_f = 1,52R$ (рисунок 2). Ориентируясь на эти значения и используя данные эксперимента, учитывая наличие не вполне определенной доли энергии струи, расходуемой на световое излучение, а также ее зависимости от расстояния между срезом сопла плазмотрона и обрабатываемой поверхностью, необходимо назначать используемую в расчетах величину r_f , которая в соответствии с [1; 2] называется условным радиусом пятна нагрева. Фигурирующий в [1; 2] коэффициент сосредоточенности потока k вычисляется при этом по формуле (2).

2. Некоторые результаты и их обсуждение. С использованием приведенных выше зависимостей разработана программа на языке *FORTRAN*, которая позволяет определять температуру в полупространстве (обрабатываемой детали) при действии подвижным нормально-круговым тепловым потоком на границу полубесконечной среды (обрабатываемую поверхность). Исходное положение центра пятна нагрева вдоль оси движения x задается в точке с координатой $x = 0$. Начальная температура принималась равной $T_0 = 0$.

В качестве исходных данных задаются ток дуги I , напряжение дуги U , коэффициент полезного действия η плазмотрона, время конца расчета t_k , глубина исследуемой зоны проникновения тепла и число разбиений этой глубины на уровни, а также характеристики материала ножа (коэффициент теплопроводности λ , удельная теплоемкость

c , плотность ρ , температура плавления $T_{пл}$), радиус пятна нагрева поверхности r_f , размер исследуемой зоны распространения тепла на поверхности (радиус R_k), скорость V движения источника нагрева.

Удельный поток, при котором за заданное время счета $t = t_k$ температура поверхности достигнет температуры плавления материала $T = T_{пл}$, вычисляется по формуле:

$$q_0 = T_{пл} \lambda \sqrt{\frac{\pi}{4at_k}}. \quad (9)$$

Температура предельного состояния в центре пятна нагрева при $t \rightarrow \infty$ определяется по формуле (3), критический тепловой поток при $T = T_{пл}$ – по формуле (5). Для заданных значений x температура $T = T(x, 0, z, t)$ в центре пятна нагрева по глубине z , $T = T(x, y, 0, t)$ на поверхности вдоль оси y , $T = T(x, y, z, t)$ по оси z в плоскостях, параллельных координатной xOz , определяются по формуле (1).

Проведен расчет температурных полей в ноже при действии движущегося нормально-кругового источника теплоты в широком диапазоне параметров обработки ($I = 10\text{--}35$ А, $U = 8\text{--}50$ В, $V = 1\text{--}100$ мм/с, $r_f = 0,05\text{--}10$ мм). 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, $\eta = 0,72$, мощности плазмотрона $P_0 = 630$ Вт, $T_{пл} = 1550$ °С,

$\rho = 7860 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $\lambda = 38 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°С}}$, $c = 745 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}$ приведены в таблице 1 и на рисунках 3–9.

Таблица 1 – Максимальные значения температур T и время t их достижения при скорости движения источника $V = 10$ мм/с, $r_f = 1$ мм

Глубина z , мм	Координаты точек									
	$x = 0$ мм		$x = 10$ мм		$x = 20$ мм		$x = 30$ мм		$x = 40$ мм	
	t , с	T_{\max} , °С	t , с	T_{\max} , °С	t , с	T_{\max} , °С	t , с	T_{\max} , °С	t , с	T_{\max} , °С
0	0,05	2141,9	1,03	3330,6	2,02	3341,9	3,02	3341,9	4,02	3341,9
1	0,16	522,5	1,10	1023,2	2,10	1024,8	3,10	1024,8	4,10	1024,8
2	0,34	203,8	1,22	435,1	2,23	436,9	3,23	436,9	4,23	436,9

Результаты показали, что стабилизация температуры происходит по логарифмической зависимости в течение нескольких секунд и далее максимальная температура в различных точках остается неизменной на всем пути движения плазмотрона.

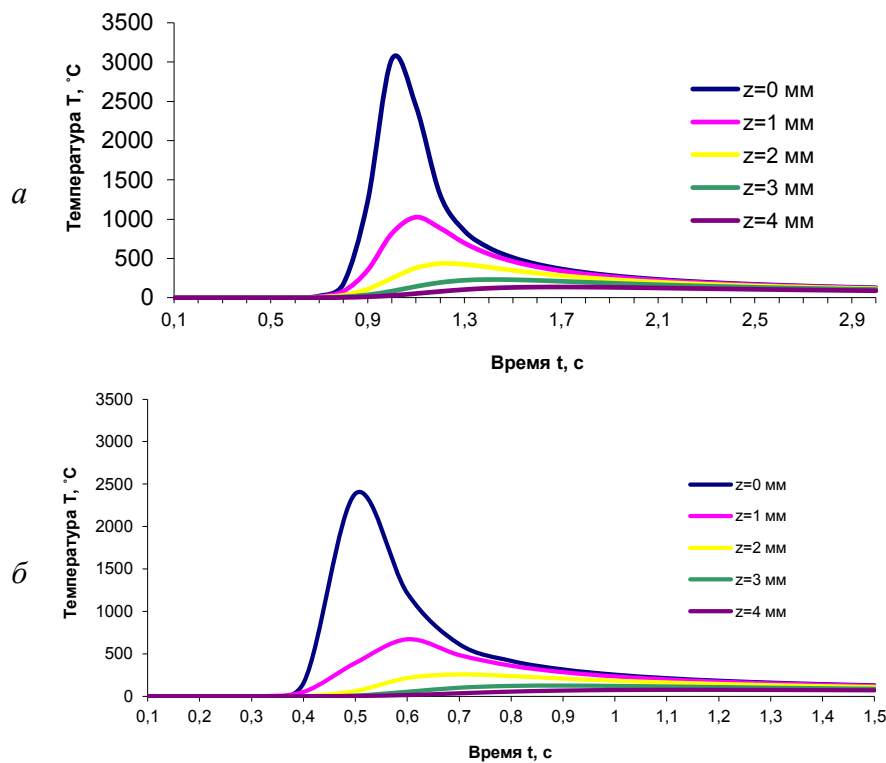


Рис. 3. Зависимости температуры от времени в плоскости движения оси плазматрона на различной глубине при $x = 10$ мм для разных скоростей движения, $r_f = 1$ мм: а) $V = 10$ мм/с, б) $V = 20$ мм/с

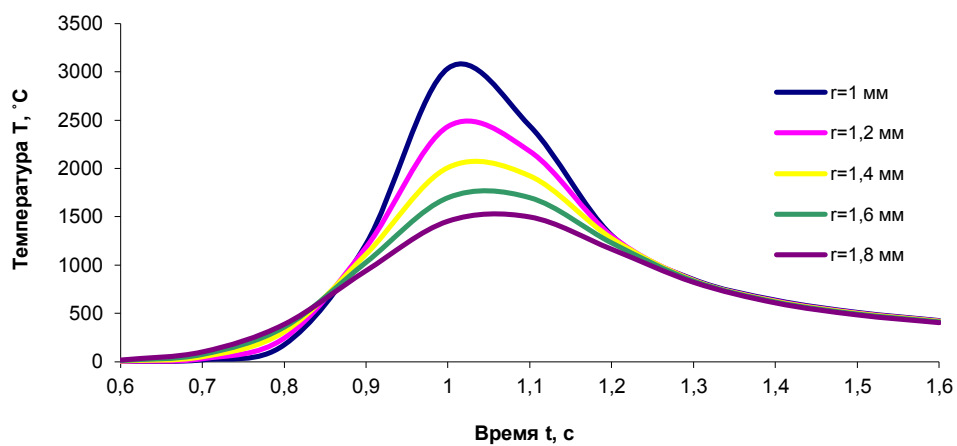


Рис. 4. Зависимости температуры от времени на термообрабатываемой поверхности ($z = 0$) в точках, лежащих на траектории движения центра пятна нагрева с различными радиусами пятна при $V = 10$ мм/с, $x = 10$ мм

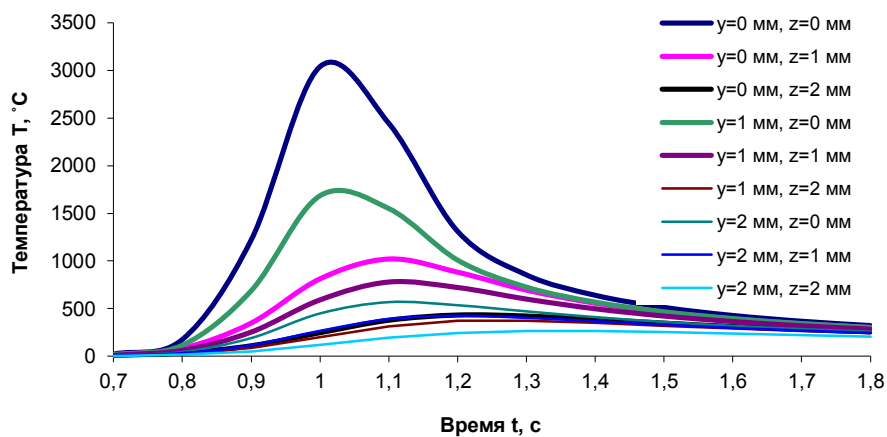


Рис. 5. Зависимость температуры от времени по оси z в плоскостях, параллельных координатной плоскости xOz , $x = 10$ мм, $V = 10$ мм/с, $r_f = 1$ мм

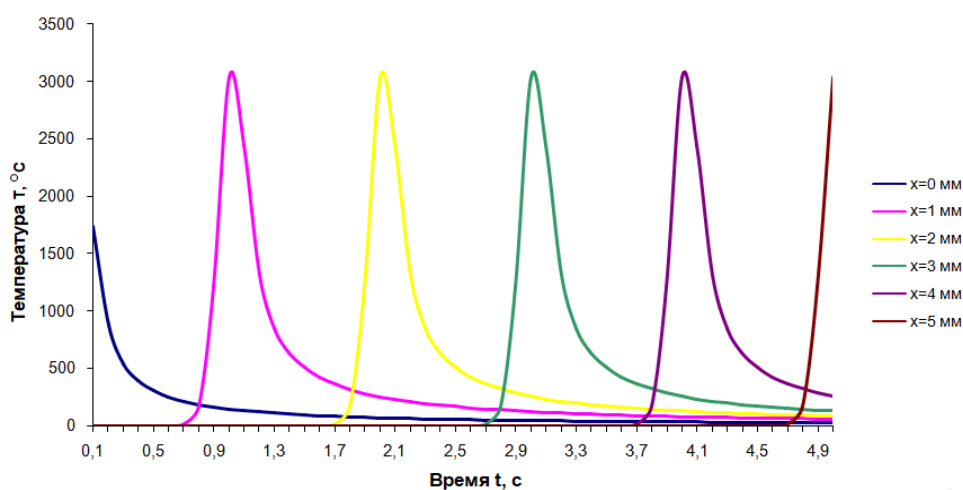
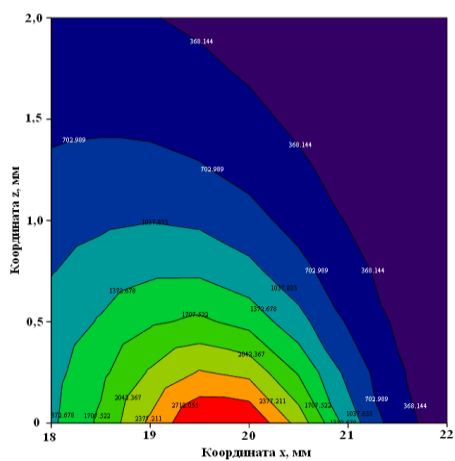


Рис. 6. Зависимости температуры от времени на обрабатываемой поверхности ($z = 0$) в точках, лежащих на траектории движения центра пятна нагрева с различными координатами при $V = 10$ мм/с, $r_f = 1$ мм

Рисунки 4–6 показывают, что распространение температуры вглубь детали происходит значительно медленнее, чем по ее поверхности. На рисунках 7–9 приведены уровни температуры (изотермы) в различных плоскостях, которые позволяют определить характер распространения температуры в заданный момент времени.

а) $t = 2,0$ с



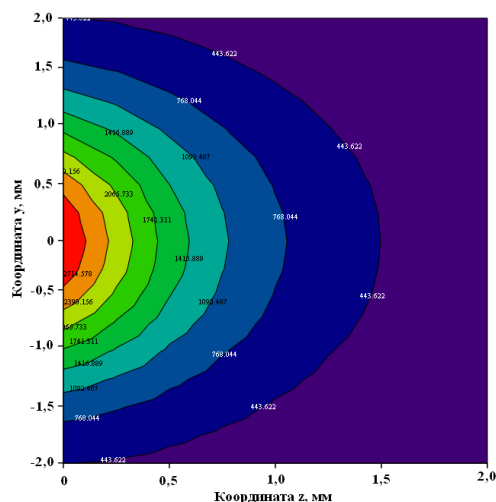


Рис. 8. Изотермы в плоскости yOz перпендикулярной траектории движения пятна нагрева, при $P_0 = 630$ Вт, $t = 2$ с, $x = 10$ мм, $V = 10$ мм/с, $r_f = 1$ мм

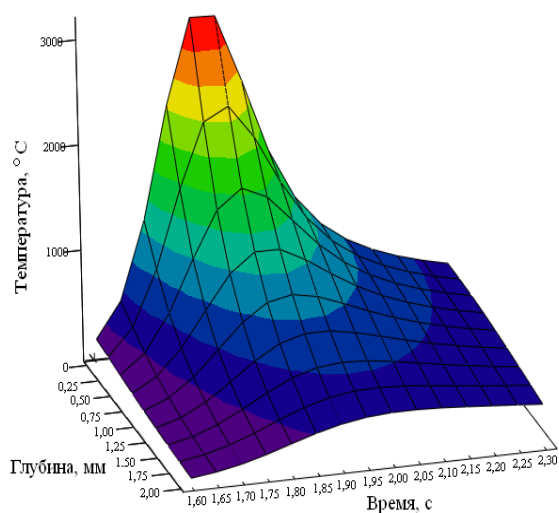
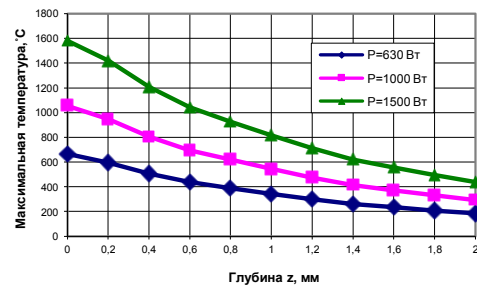
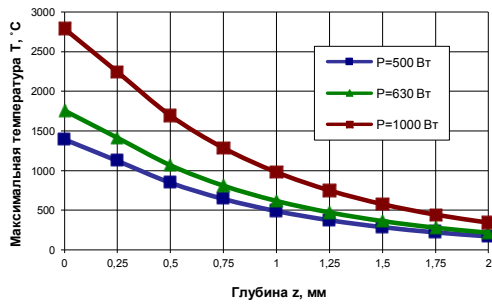


Рис. 9. Распределение температуры по времени и глубине при $x = 18$ мм, $P_0 = 630$ Вт, $V = 10$ мм/с, $r_f = 1$ мм

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 [10].

Проведены исследования влияния мощности плазмотрона на тепловые процессы в зоне нагрева. Типичная зависимость максимальной температуры от глубины для различных мощностей и радиусов пятна приведены на рисунке 10.



а) $x_0 = 15 \text{ мм}$, $r_f = 1,557 \text{ мм}$, $V = 10 \text{ мм/с}$

б) $x_0 = 25 \text{ мм}$, $r_f = 2,929 \text{ мм}$,
 $V = 17,5 \text{ мм/с}$

Рис. 10. Зависимость максимальной температуры от глубины

Исследования изменения максимальной температуры по глубине необходимы для определения взаимосвязи между температурным полем и характеристиками материала упрочненной зоны путем сопоставления полученных зависимостей с графиком изменения микротвердости.

Темп изменения температуры при нагревании или охлаждении определяет величину температурных градиентов и напряжений и безусловно влияет на фазовые превращения в металле. Поэтому совершенно ясно, что скорости нагрева или охлаждения должны оказывать огромное влияние на структуру материала в зоне нагрева. Из-за малого объема разогреваемого под дугой металла высокая скорость охлаждения может обеспечиваться лишь теплопроводностью (отводом тепла в ненагретые области изделия). Из рисунков 4–6 видно, что нагрев и охлаждение материала происходят с разными скоростями, поэтому проведены теоретические исследования скоростей нагрева (охлаждения) при различных режимах теплового воздействия. Типичные зависимости максимальных значений температуры, скоростей нагрева и охлаждения от скорости движения источника тепла при $r_f = 2,929 \text{ мм}$, $P_0 = 1000 \text{ Вт}$ приведены на рисунке 11. Сравнение полученных результатов с расчетами [11] показало хорошее их совпадение.

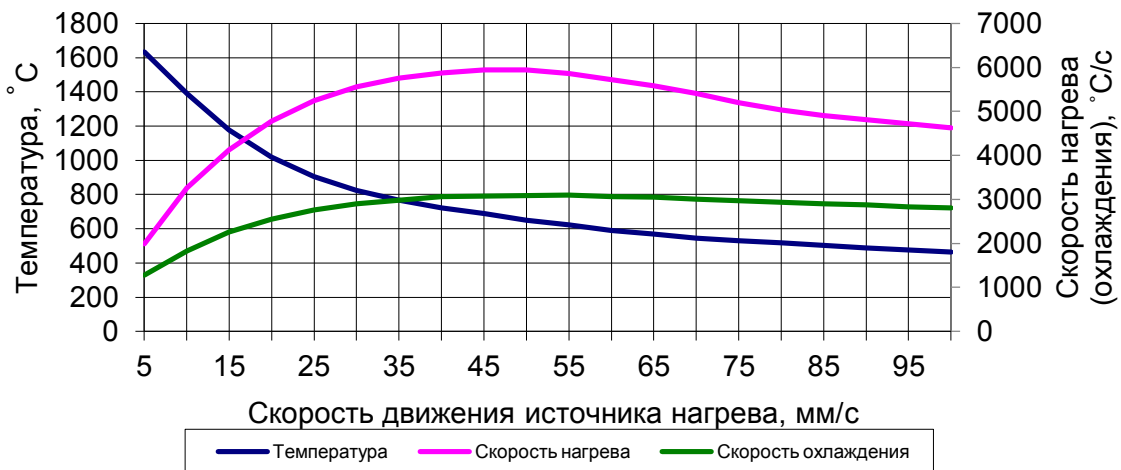


Рис. 11. Зависимости максимальной температуры, скоростей нагрева и охлаждения от скорости движения источника тепла при $z = 0$, $r_f = 2,929 \text{ мм}$, $P_0 = 1000 \text{ Вт}$

Заключение. Проведено исследование тепловых процессов в ноже гильотинных ножниц из стали 6ХВ2С при поверхностной плазменной закалке рабочей зоны. Рассмотрен случай действия подвижного нормально-кругового теплового потока на материал режущей зоны ножа. На основе разработанного алгоритма решения задачи нестационарной теплопроводности с использованием разработанной компьютерной программы для широкого диапазона режимов работы плазмотрона получены зависимости температурного поля, скоростей нагрева и охлаждения от времени и координат. Исследовано влияние параметров процесса поверхностной плазменной закалки (характеристик плазмотрона, радиуса пятна нагрева, скорости движения источника нагрева и др.) на температурное поле в зоне нагрева. Установлено, что при увеличении скорости обработки наблюдается уменьшение глубины зоны термического влияния и снижение твердости материала.

Полученные в результате расчетов трехмерные нестационарные поля температур позволяют определить параметры режима плазменного упрочнения изделий, которые обеспечивают формирование зоны термического влияния заданной глубины. Дальнейшее развитие разработанной механико-математической модели процесса плазменного упрочнения позволит установить соответствие между полученными в расчетах полями температур, скоростями охлаждения и структурой упрочненного слоя.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Гречнева, М. В. Краткий анализ результатов работ в области плазменного поверхностного упрочнения сталей и сплавов / М. В. Гречнева // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21, № 5. – С. 10–23.
2. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справочник / Н. Н. Рыкалин [и др.] – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
3. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М. : ГНТИ Машиностроительной литературы, 1951. – 296 с.
4. Лещинский, Л. К. Плазменное поверхностное упрочнение / Л. К. Лещинский, С. С. Смотугин, И. И. Пирч. – Киев : Техника, 1990. – 109 с.
5. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М. : Наука, 1964. – 488 с.
6. Теория температурных напряжений / Б. Боли, Дж. Уэйнер – М. : Мир, 1964. – 518 с.
7. Chi-Kyung Kim. An analytical solution to heat conduction with a moving heat source (2011) // Journal of Mechanical Science and Technology 25(4) – P. 895–899. – DOI:10.1007/s12206–011–0214–5.
8. Naik, D. K. and Maity, K. (2019), Temperature analysis by moving heat source during plasma arc cutting process: an analytical approach, World Journal of Engineering – Vol. 16 No. 4 – P. 569–572. – <https://doi.org/10.1108/WJE-11–2018–0400>.
9. Zhicheng Hu, Zhihui Liu. Heat Conduction Simulation of 2D Moving Heat Source Problems Using a Moving Mesh Method Advances in Mathematical Physics Volume 2020, Article ID 6067854 – 16 pages. – <https://doi.org/10.1155/2020/6067854>.

10. Веремейчик, А. И. Температурное поле в ноже гильотинных ножниц при действии движущегося нормально-кругового источника нагрева / А. И. Веремейчик, В. М. Хвисевич, Б. Г. Холодарь // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: сборник статей / Брестский государственный технический университет. – Брест : Издательство БрГТУ, 2022. – С. 188–193.

11. Коротков, В. А. Поверхностная плазменная закалка / В. А. Коротков; М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил : НТИ (филиал), УрФУ, 2012. – 64 с.

Поступила: 08.03.2023