

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Процессы пластического структурообразования металлов / В. М. Сегал, В. И. Резников, А. Е. Дробышевский, В. И. Копылов и др. – Мн.: Навука і тэхніка. 1994. - 232 с.
2. Iwahashi, Y. An investigation of microstructural evolution during equal channel angular pressing / Iwahashi, Y., Z. Horita, M. Nemoto and T.G. Langdon // Acta Materialia. – 1997. – 45. – P. 4733-4741.
3. Балакин, В. Ф. Анализ возможностей различных технологических смазок в процессах с ИПД / В.Ф. Балакин, В.С. Гришин, И.А. Соловьева, О.В. Сергеева, К.С. Белан // Теория и практика металлургии 1-2 2012 с.52-55.
4. Клубович В.В., Степаненко А.В. Ультразвук и пластичность.- Минск: Наука и техника, 1976. - 446 с.
5. Шилин, А.Д., Ультразвуковая механоактивация порошковых материалов / А.Д. Шилин, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник (мл.) // Перспективные материалы и технологии / Под. ред. В.В.Клубовича – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2013. – Гл. 30. – С. 630-651.
6. Рубаник, В. В. Влияние ультразвукового воздействия на силовые характеристики равноканального углового прессования цинка / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., М.С. Ломач, В.Ф. Луцко, В.В. Дедюро // Техническа акустика: разработки, проблемы, перспективы. Материалы межд. научн. конф. Витебск, Беларусь 25-28 мая 2021. - С.132-133.
7. Kumar, V.C. Reduction of the sliding friction of metals by the application of longitudinal or transverse ultrasonic vibration / V.C. Kumar, I.M. Hutchings // Tribology International. - 2004. - V. 37. – P. 833–840.

УДК 539.3:621.78

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛА ПРИ ДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ

**Веремейчик А.И., Онысько С.Р., Хвисевич В.М., Холодарь Б.Г.,
Хеук М.В., Ярмак М.А.**

Брестский государственный технический университет, г. Брест,
Республика Беларусь

При поверхностной плазменной закалке используется действие движущихся концентрированных источников энергии, создающих направленную высокотемпературную газовую струю с плотность теплового потока на поверхности $10^7 - 10^{10} \frac{Вт}{м^2}$. Поверхностная закалка сталей связана с изменением фазовой структуры и физико-механических характеристик материала и созданием в нем мелкозернистого мартенсита. Для обеспечения этого процесса производится

нагрев материала до температур, превышающих температуру точки фазового превращения, с последующим быстрым охлаждением. Данные о температуре необходимы для оптимизации режимов плазменной закалки. Аналитическое решение температурных задач связано с определенными сложностями, касающимися учета лучистого теплообмена, составляющей до 30 % от общего баланса энергии, учета изменения физико-механических характеристик материала в зоне термического влияния и зависимости свойств материала от температуры. Для проверки результатов и подтверждения выявленных закономерностей теоретических исследований необходимы экспериментальные исследования теплового поля. Наиболее удобными для практического контроля термических процессов в сфере машиностроения являются бесконтактные методы определения температуры, основанные на регистрации теплового излучения, испускаемого обрабатываемой поверхностью [1].

С целью улучшения свойств поверхностного слоя проведена закалка режущего лезвия ножа гильотинных ножниц из стали 6ХВ2С. Схема термообработки приведена на рисунке 1. Обработка производилась на автоматизированном комплексе Advercut К6090Т с использованием разработанного узла крепления плазмотрона к элементам комплекса при следующих режимах: ток дуги $I=30$ А, напряжение $U=18$ В, давление аргона $P_{Ar}=0,22$ МПа, давление азота $P_{N_2}=0,3$ МПа, расход аргона $V_{Ar}=0,3$ л/ч., расход азота $V_{N_2}=0,08$ л/ч. Скорость движения плазмотрона варьировалась в диапазоне $v=10\dots25$ мм/с.



Рисунок 1 – Схема обработки ножа гильотинных ножниц плазменной струей

Для экспериментального определения температурного поля на поверхности материала в зоне действия плазменной струи с целью подтверждения теоретических результатов [2] применялся компьютеризированный высокотемпературный трехзональный тепловизор ИТ-3СМ. Тепловизор ИТ-3СМ предназначен для исследования термических процессов обработки изделий из черных металлов и способен измерять температуру в двух температурных диапазонах: от 800 до 1500 °С или от 1500 до 3000 °С.

ИТ-3СМ состоит из цифровой видеокамеры специального назначения, регистрирующей тепловое излучение в трех перекрывающихся зонах спектра, которые лежат в диапазоне 630–830 нм, и управляющего компьютера (рисунок 2).

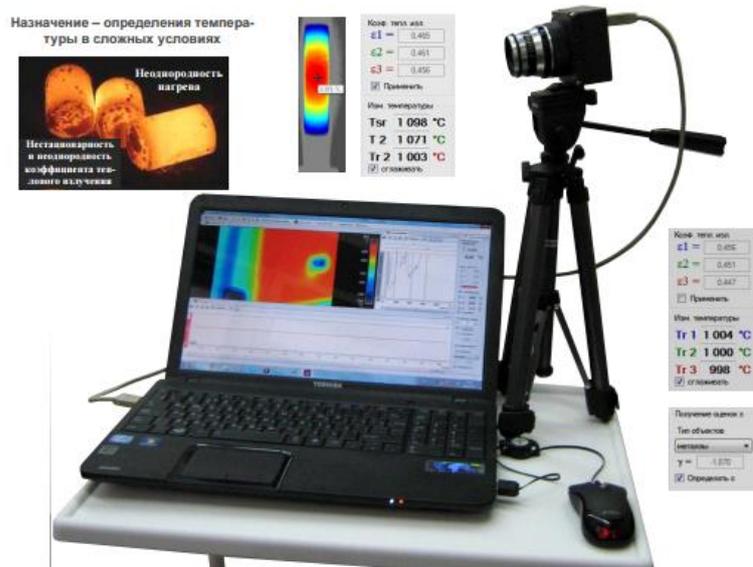


Рисунок 2 – Общий вид высокотемпературного трехзонального тепловизора ИТ-3СМ

На рисунке 3 приведена зависимость максимальных значений температурного поля от времени и температурное поле на поверхности детали при скорости перемещения источника нагрева $v=10$ мм/с.

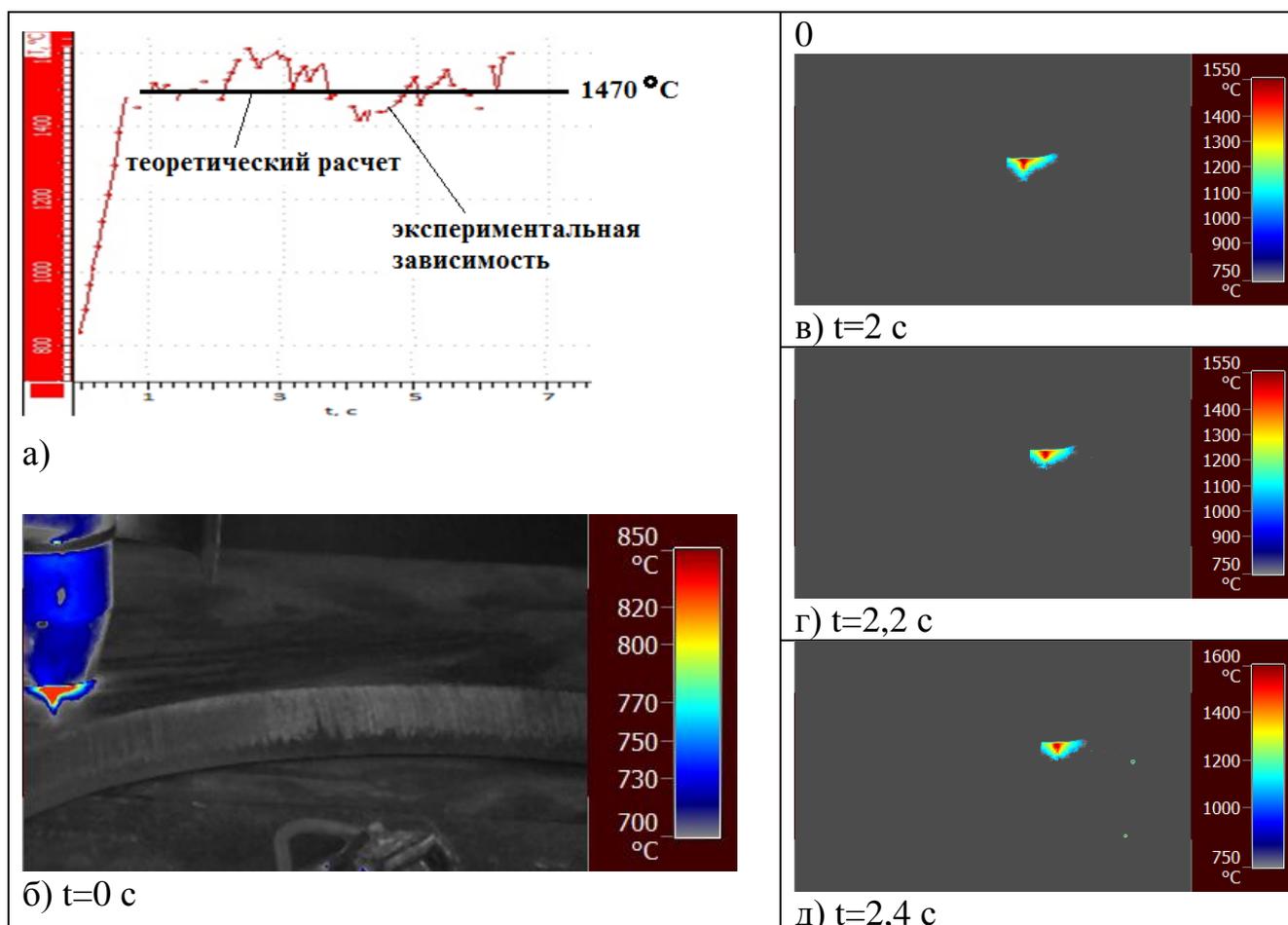


Рисунок 3 – Временная зависимость максимальных значений температуры (а) и формируемое плазменной струей температурное поле в различные моменты времени (б–д) при $v=10$ мм/с, расстояние от объектива до нагреваемой поверхности $z=0,9$ м, отношение диаметра линзы D к фокусному расстоянию f : $D/f=1/16$, $f=57$ мм

Теоретические исследования проводились в широком диапазоне параметров плазменной закалки ($I=10-35$ А, $U=8-50$ В, $v=1-100$ см/с, $r_f=0,05-0,5$ см) [2]. Уравнение для расчета температуры T в точке тела от действия перемещающегося с постоянной скоростью V вдоль оси x нормально-кругового источника теплоты в подвижной системе координат для одной полосы упрочнения имеет вид [3]:

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

где t – время, z – координата вдоль оси воздействия, $P_0 = q_0 \frac{\pi}{k}$ – эффективная

мощность источника тепла, $k = \frac{1}{(r_f)^2}$ – коэффициент сосредоточенности пото-

ка; q_0 – плотность теплового потока; λ – коэффициент теплопроводности материала, $a = \lambda/c\rho$, c – удельная теплоемкость, ρ – плотность материала; r – текущий радиус; $t_0 = \frac{1}{4ak}$ – постоянная

времени.

С использованием разработанной программы на языке FORTRAN проведен расчет температурных полей при действии движущегося нормально-кругового источника теплоты как в центре пятна нагрева, так и на поверхности материала. Типичная зависимость температурного поля от времени при $I=30$ А, $U=18$ В, $r_f=2,5$ мм, $v=10$ мм/с, КПД плазмотрона $\eta=0,72$, температуре плавления стали $T^{пл} = 1550$ °С, $\rho = 7860 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $\lambda = 38 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°С}}$, $c = 745 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}$ приведена на рисунке 4.

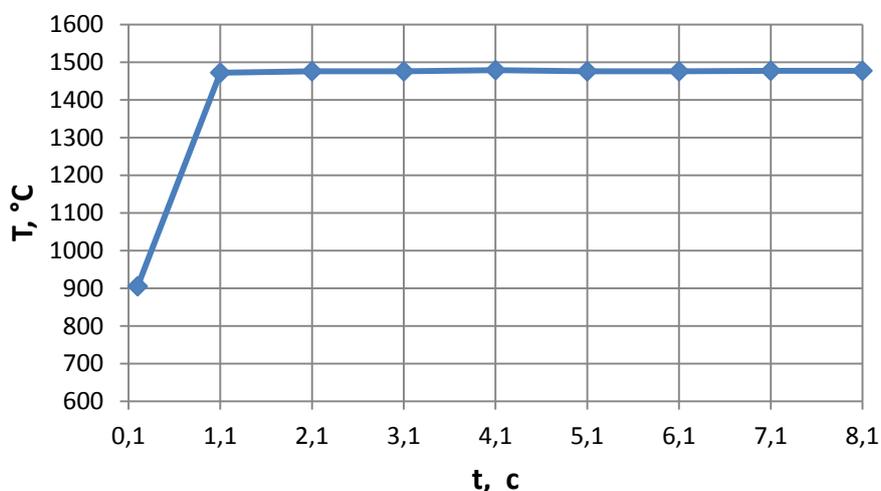
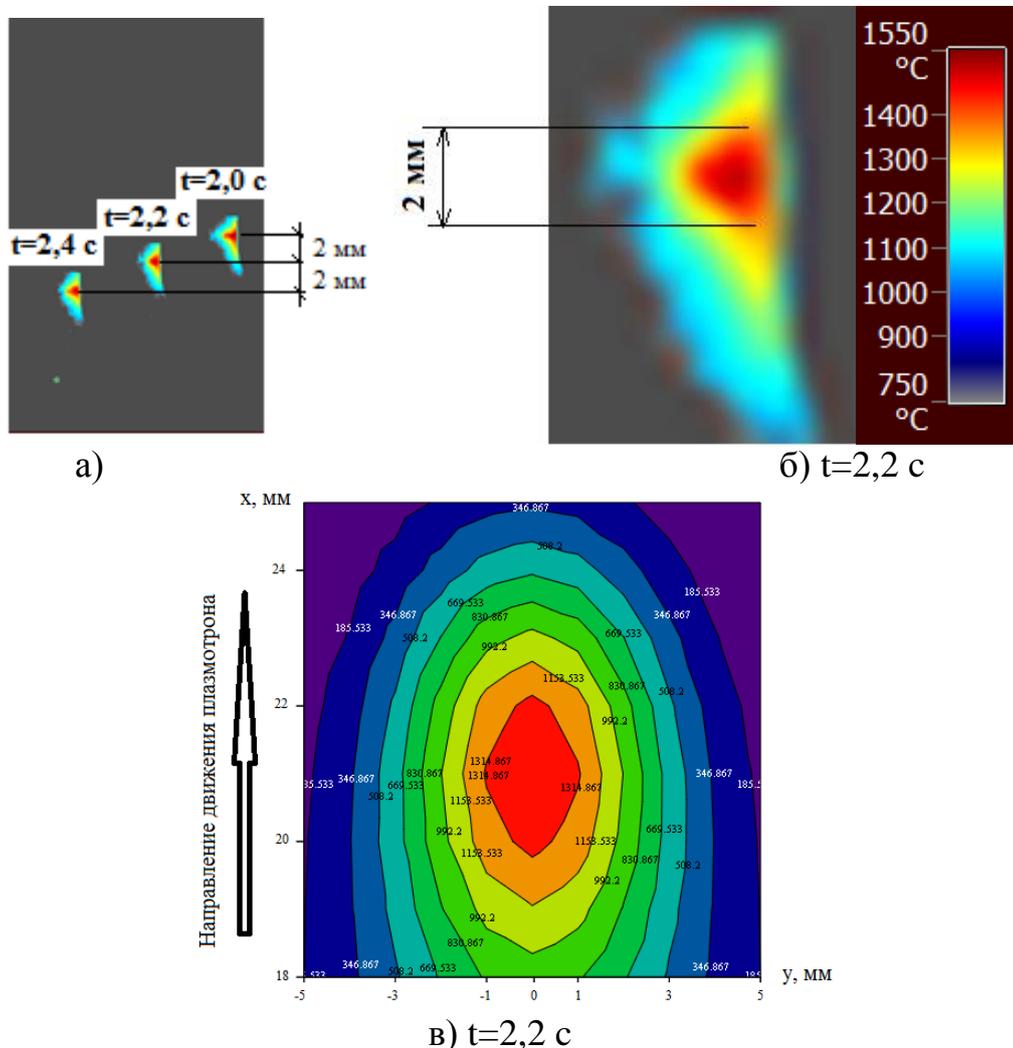


Рисунок 4 – Зависимость максимальной температуры от времени в центре пятна нагрева с координатой $x=22$ мм

По результатам экспериментальных исследований установлен размер пятна нагрева. Для этого проведено наложение пятен для различных моментов времени с интервалом 0,2 с (рисунок 5, а) при скорости движения плазмотрона $v=10$ мм/с. Установлено, что размер пятна составляет около 2 мм (рисунок 5, б), что подтверждает результаты теоретического расчета с помощью разработанной программы при $r_f=0,25$ см (рисунок 5, в).



**Рисунок 5 – Распределение теплового поля на поверхности материала при $v=10$ мм/с
а, б – экспериментальные результаты; в) теоретический расчет**

Полученные результаты экспериментальных и теоретических исследований позволят оптимизировать режимы термообработки с последующим их уточнением в процессе технологических экспериментов плазменной закалки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Фираго, В. А., Левкович, Н. В., Тягунов, О. В., Сакович, И. А., Семенович, С. Н., & Стецко, И. П. (2016). Высокотемпературный трехзональный тепловизор высокого разрешения ИТ-3СМ.
2. 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.