

УДК 621.658.012.531

С.С. Самотугин, профессор, д-р техн. наук,

В.А. Мазур, доцент, канд. техн. наук,

Д.С. Литвиненко, ассистент

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет»

ул. Университетская, 7, г. Мариуполь, Украина, 87500

dsl.mariupol@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ ПОВЕРХНОСТНОМ УПРОЧНЕНИИ ТОНКОЛЕЗВИЙНОГО ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Разработана математическая модель процесса плазменного упрочнения тонколезвийного почвообрабатывающего инструмента. Показан характер распространения тепла в зоне термического влияния, а также приведены зависимости для определения температуры в произвольной точке тела.

На основании выведенных зависимостей и составленной блок-схемы расчета создана компьютерная программа.

Ключевые слова: *плазма, упрочнение, источник нагрева, модель, инструмент, клин.*

На сегодняшний день существует целый ряд методов повышения износостойкости лезвийного почвообрабатывающего инструмента. Наиболее распространенным из которых является объемная термическая обработка – закалка + отпуск. Кроме абразивного износа, рабочие органы зачастую подвержены воздействию значительных динамических нагрузок. Поэтому отпуск в процессе объемной термообработки обычно выполняют средним или высоким (300...600°C), чтобы обеспечить достаточную вязкость стали. Повышение температуры отпуска закаленной стали приводит к пропорциональному снижению ее износостойкости. Поэтому для инструмента, работающего в условиях интенсивного ударно-абразивного изнашивания, эффективно сохранение высокой исходной вязкости основного металла и повышение износостойкости рабочей кромки методами поверхностного упрочнения, из которых применительно к рабочим органам сельхозмашин распространение получили: закалка ТВЧ, дуговая наплавка высоколегированными материалами. Однако, данные методы упрочнения реализуются со значительным разогревом изделий, что может сопровождаться образованием деформаций и технологических трещин. Наиболее перспективно использовать для упрочнения тонколезвийного инструмента обработку высококонцентрированными источниками нагрева (ВКИН), из которых самой доступной и экономичной является плазменная обработка [1].

Достаточно высокие технологические возможности плазменной обработки позволяют выполнять упрочнение как без оплавления, так и с микро- или макрооплавлением. Вместе с тем в случае обработки заточенного лезвийного инструмента особенности фазовых и структурных превращений в обрабатываемом материале накладывают жесткие требования к выбору оптимальных значений температуры нагрева при поверхностном упрочнении. В связи с этим требуется тщательная экспериментальная отработка режимов плазменного нагрева почвообрабатывающего инструмента. Данная задача может быть выполнена с использованием математического моделирования процесса распределения температурных полей в поверхностном слое инструмента при локальном концентрированном нагреве.

Математические модели процессов распространения тепла при плазменной обработке представлены в ряде работ. Известны расчетные модели и для оценки тепловых процессов при нагреве изделий клиновидной (острозаточенной) формы – при шлифовании и лазерном упрочнении. Вместе с тем, применение известных моделей в нелинейной постановке на инженерном уровне может быть затруднено, т.к. для их решения необходимо использование конечноэлементных численных методов. Более удобными в этом случае являются решения дифференциальных уравнений теплопроводности в линейной постановке [2]. Применительно к плазменному упрочнению такие модели представлены в работе [3]. Однако, в литературе отсутствуют сведения об особенностях моделирования тепловых процессов при упрочнении почвообрабатывающего острозаточенного инструмента вдоль рабочей кромки.

Поскольку в диапазоне температур от 0 до 1600 °C теплопроводность, теплоемкость и температуропроводность значительно изменяются, то расчет температур ведется с большой погрешностью (20-30 %), и оценка теплового воздействия ВКИН на упрочненный материал носит не количественный, а качественный характер. При построении модели плазменной обработки необходимо свести к минимуму погрешность расчетов для корректного разграничения вариантов обработки: без

оплавления, с микро- или макрооплавлением, поскольку температурный диапазон, разграничивающий переход от одного способа обработки к другому, очень мал.

В общем случае рабочая часть почвообрабатывающего инструмента имеет форму клина. На сегодняшний день известны методики расчета влияния высококонцентрированной плазменной струи на целый ряд тел, основными из которых являются: полубесконечное тело (валковый, штамповый инструмент, детали машин, имеющие плоскую или цилиндрическую поверхность), ограниченное полубесконечное тело (резец, режущая кромка сверел, зенкеров, фрез), тело ограниченное с двух сторон (режущие пластины при упрочнении по задней поверхности, зубья шлицевых и модульных червячных фрез), пластина (режущие пластины при упрочнении по передней поверхности). В качестве базовой расчетной модели при моделировании плазменного нагрева тела клиновидной формы можно использовать модель нагрева тела типа пластина [4].

Тепловложение в материал пластины усложнено наличием нижней грани, выступающей в качестве адиабатической границы. Тепло отражается от этой границы, внося дополнительный вклад в нагрев тела. Расчетная схема мощного быстродвижущегося нормально-кругового источника нагрева на поверхности пластины показана на рисунке 1.

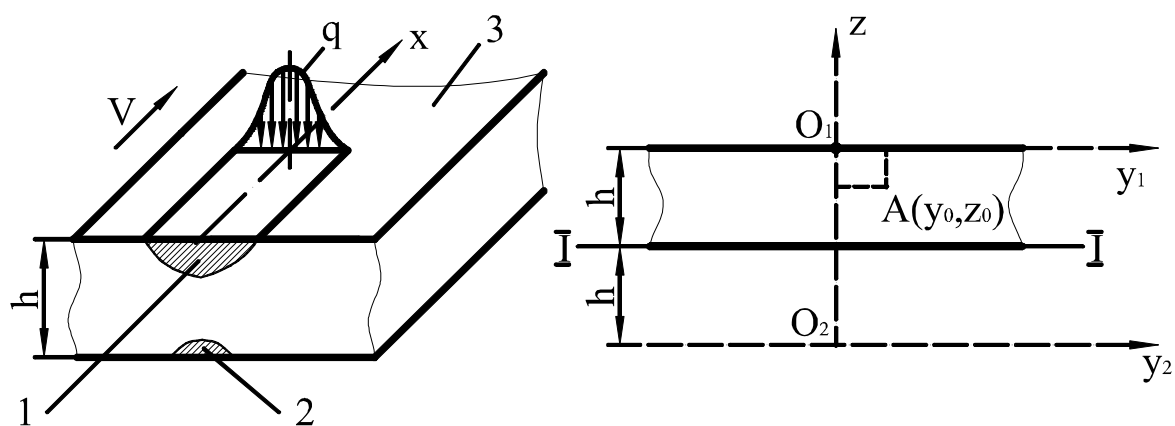


Рисунок 1 – Схема мощного быстродвижущегося нормально-кругового источника нагрева на поверхности пластины: q – мощность плазменного нагрева; h – толщина пластины; V – направление обработки; 1 – упрочненная зона; 2 – упрочненная зона от действия «фигтивного» источника нагрева; 3 – упрочняемое изделие; I-I – адиабатическая граница

Согласно работе [4], дополнительное тепловложение в материал пластины учитывается введением второго (фигтивного) источника нагрева, располагающегося под нижней гранью на расстоянии $2h$ от поверхности пластины. Тогда, для произвольной точки A с координатами (y_0, z_0) в момент времени t суммарная температура нагрева от действия действительного и фигтивного источников определяется уравнением:

$$T_{\Sigma} = \frac{2q}{VC\gamma} \cdot \frac{e^{-\frac{y_0^2}{4a(t_0+t)}}}{\sqrt{4\pi a(t_0+t)}} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{(2h-z_0)^2}{4at}}}{\sqrt{4\pi at}} + \frac{e^{-\frac{z_0^2}{4at}}}{\sqrt{4\pi at}} \right) \quad (1)$$

где q – эффективная удельная мощность плазменного нагрева; λ – коэффициент теплопроводности; a – коэффициент температуропроводности; C_{γ} – объемная теплоемкость; $t_0 = (4 \cdot a \cdot k)^{-1}$ – постоянная времени нагрева.

Эффективная удельная мощность плазменного нагрева определяется выражением

$$q = \eta_T \cdot \eta_c \cdot q_0 \quad (2)$$

где η_T – термический КПД плазмотрона; η_c – КПД плазменной струи; q_0 – мощность, подведенная к струе.

Термический КПД плазмотронов косвенного действия, используемых для поверхностного упрочнения, определяют в зависимости от параметров режима (тока, напряжения, расхода плазмообразующего газа) и геометрических характеристик плазмотрона (диаметра канала d_k и диаметра отверстия сопла d_c) [3]. КПД плазменной струи учитывает потери теплоты на участке сопло – изделие. При малых расстояниях от среза сопла до поверхности изделия l (при плазменном упрочнении $l = 5 \pm 1$ мм) КПД струи близок к 100%, т.е. с достаточной для практических целей точностью можно принять $\eta_c = 1$.

При перемещении плазменной струи вдоль наружной кромки почвообрабатывающего инструмента (рисунок 2) характер распространения тепла усложнится из-за наклона нижней грани под углом α .

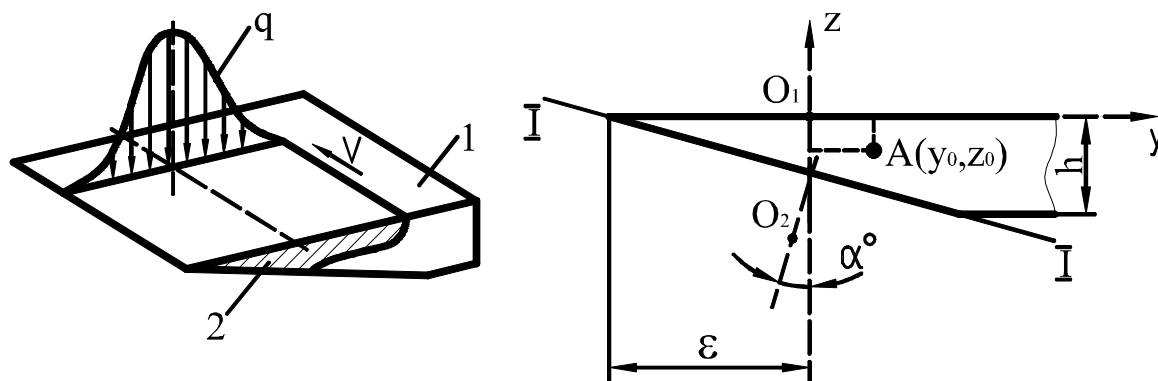


Рисунок 2 – Схема к расчету температурного поля при плазменном упрочнении почвообрабатывающего инструмента вдоль рабочей кромки: q – мощность плазменного нагрева; h – высота изделия; V – направление обработки; 1 – упрочняемое изделие; 2 – ; I-I – адиабатическая граница

Принимая во внимание конструктивные особенности инструмента (угол заострения α и расстояние до центральной оси действия источников нагрева ϵ) можно вывести зависимости для определения температуры в произвольной точке A с координатами (y_0, z_0) от действия действительного и фиктивного источников нагрева.

Температура от действительного источника нагрева учитывается уравнением [2]:

$$T_1(y_0, z_0, t) = \frac{2q}{VC\gamma} \cdot \frac{e^{-\frac{z_0^2}{4at}}}{\sqrt{4\pi at}} \cdot \frac{e^{-\frac{y_0^2}{4a(t_0+t)}}}{\sqrt{4\pi a(t_0+t)}} \quad (3)$$

В свою очередь, влияние фиктивного источника на режущий клин можно выразить следующей зависимостью:

$$T_2(y_0, z_0, t) = \frac{2q}{VC\gamma} \cdot \frac{e^{-\frac{(\epsilon \cdot \tan \alpha + \epsilon \cdot \sin \alpha - z_0)^2}{4at}}}{\sqrt{4\pi at}} \cdot \frac{e^{-\frac{(\epsilon \cdot \tan \alpha \cdot \sin \alpha + y_0)^2}{4a(t_0+t)}}}{\sqrt{4\pi a(t_0+t)}} \quad (4)$$

Тогда суммарная температура от влияния обоих источников будет определяться как:

$$T_{\Sigma} = T_1(y_0, z_0, t) + T_2(y_0, z_0, t) \quad (5)$$

$$T_{\Sigma} = \frac{q}{2VC\gamma\pi a\sqrt{t(t_0+t)}} \cdot \left(e^{-\left(\frac{z_0^2}{4at} + \frac{y_0^2}{4a(t_0+t)}\right)} + e^{-\left(\frac{(\epsilon \cdot \tan \alpha + \epsilon \cdot \sin \alpha - z_0)^2}{4at} + \frac{(\epsilon \cdot \tan \alpha \cdot \sin \alpha + y_0)^2}{4a(t_0+t)}\right)} \right)$$

Мгновенная скорость охлаждения w в произвольной точке A с координатами (y_0, z_0) может быть определена как первая производная выражения (5) по времени. Важная для практических целей характеристика – максимальная температура нагрева T_{max} в точке A – определяется из уравнения (5) расчетом с переменным шагом интегрирования по времени $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ до выполнения условия $T_{i+1} < T_i$ с учетом монотонного характера изменения температуры, тогда $T_i = T_{max}$.

Результаты расчета температур в произвольной точке A с координатами (y_0, z_0) при плазменном поверхностном упрочнении лезвийного почвообрабатывающего инструмента представлены на графике (рисунок 3).

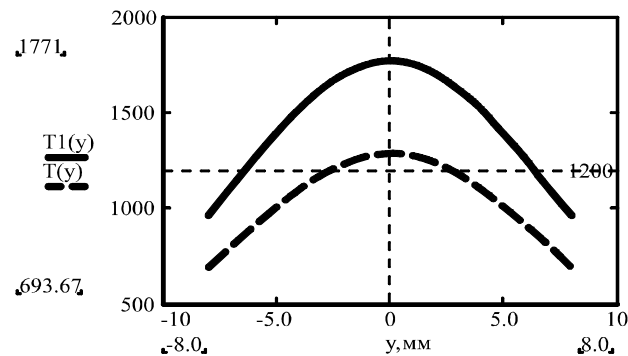
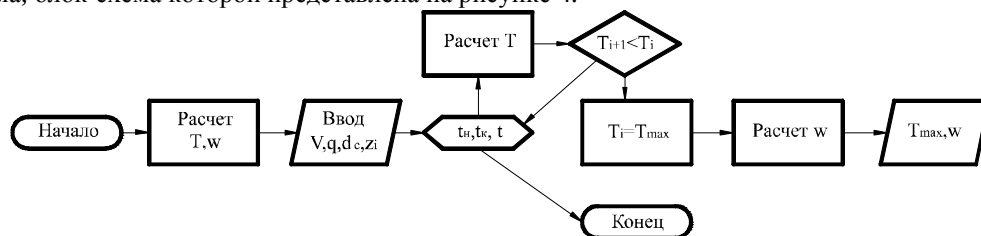
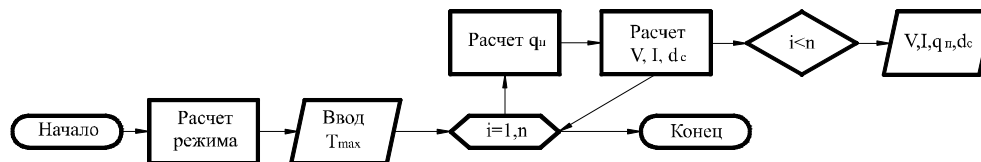


Рисунок 3 – Распределение температур в точке А с координатами (y_0, z_0) от действия высококонцентрированного плазменного источника нагрева: T_1 – с учетом постоянства теплофизических свойств упрочняемого материала, T – теплофизические свойства упрочняемого материала принимались зависимыми от температуры

Для расчета T_{max} и w на ЭВМ в зависимости от теплофизических характеристик обрабатываемой стали (a, λ), режима упрочнения (q, V) и координат рассматриваемых точек разработана математическая программа, блок-схема которой представлена на рисунке 4.



а) Алгоритм решения прямой задачи



б) Алгоритм решения обратной задачи

Рисунок 4 – Блок-схема программы к расчету параметров термического цикла плазменной обработки почвообрабатывающего инструмента

Разработанная программа позволяет решать как прямую задачу расчета – вычисление максимальной температуры нагрева и скорости охлаждения в заданных точках изделия при заданных значениях параметров режима обработки, так и обратную – вычисление требуемых (оптимальных) режимов обработки, обеспечивающих достижение заданных значений температуры нагрева на заданном расстоянии от поверхности (заданной глубине упрочненной зоны).

Алгоритм выполнения действий при решении прямой задачи:

1. Задаются исходные данные q, V, d_c, z , а также a и λ .
2. Вводится значение длительности плазменной обработки t .
3. Задается переменное значение координаты y , дискретно увеличивающееся в диапазоне $y = -0,8 \dots 0,8$ см. с шагом $\Delta y = 0,01$ см., согласно условию $y_i = y_{i-1} + \Delta y$.
4. Вычисляются значения температуры нагрева T_i при заданных исходных параметрах с задаваемыми переменными значениями координаты y .
5. Первому рассчитанному значению температуры нагрева присваивается индекс « i », каждое значение T_{i+1} сравнивается с предыдущим значением T_i .
6. Операция сравнения повторяется до выполнения условия $T_{i+1} < T_i$, тогда T_i считается максимальной температурой нагрева в точке с координатами (z, y_i) .
7. По выбранному максимальному значению температуры нагрева выполняется расчет w как первой производной от температуры нагрева по времени.

Алгоритм выполнения действий при решении обратной задачи:

1. Задаются значения максимальной температуры нагрева в точке на заданной глубине z , а также теплофизические свойства упрочняемой стали a и λ .

2. Производится последовательный расчет погонной энергии плазменной обработки:

$$\frac{q}{V} = \frac{\eta IU}{V} = q_{II} \quad (6)$$

3. Исходя из рассчитанного значения погонной энергии задаются параметры режима плазменного упрочнения I, U, V .

Разработанную программу используют на практике для вычисления и корректировки оптимальных значений режима плазменного упрочнения почвообрабатывающего инструмента.

Корректность выбранной модели расчета подтверждается замерами микротвердости (твердости по Виккерсу). Характерной особенностью плазменного поверхностного упрочнения является наличие резкой границы между закаленной зоной и исходным металлом с резким перепадом значений твердости. Это, в свою очередь, позволяет достаточно точно определять размеры закаленной зоны.

Выводы:

1. Эффективным методом поверхностного упрочнения почвообрабатывающего тонколезвийного (клиновидной формы) инструмента является обработка высококонцентрированной плазменной струей, обеспечивающая получение в поверхностном слое более высоких эксплуатационных свойств благодаря образованию упрочненной зоны с ультрадисперсной мартенситной структурой.

2. Разработана математическая модель распространения тепла от действия высококонцентрированного источника нагрева, позволяющая решать такие задачи, как:

а) определение температуры в заданной точке материала по известным параметрам режима плазменной обработки;

б) расчет погонной тепловой энергии q/v , необходимой для нагрева заданной области материала до требуемых температур, что дает возможность оптимизировать технологические параметры (сила тока, скорость обработки) для реализации различных вариантов упрочнения

Бibliографический список использованной литературы:

1. Плазменное упрочнение лезвийного почвообрабатывающего инструмента / С.С. Сомотугин, Д.С. Литвиненко, В.А. Мазур, В.А. Гагарин // Металл и литье Украины. — 2009. — № 11–12. — С. 26–29.
2. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. — М: Машгиз, 1951. — 296 с.
3. Сомотугин С.С. Плазменное упрочнение инструментальных материалов / С.С. Сомотугин, Л.К. Лещинский. — Донецк: Новый мир, 2003. — 338 с.
4. Сомотугин С.С. Математическое описание процессов распространения тепла в инструменте сложной формы от действия плазменного источника нагрева / С.С. Сомотугин, О.Ю. Нестеров и др. // Вестник Инженерной академии наук Украины. — 2004. — № 1. — С. 101–107.

Поступила в редакцию 20.03.2012 г.

Сомотугін С.С., Мазур В.О., Литвиненко Д.С. Моделювання теплових процесів при плазмовому поверхневому зміцненні тонколезового ґрунтообробного інструменту

Розроблено математичну модель процесу плазмового зміцнення тонколезового ґрунтообробного інструменту. Показаний характер поширення тепла в зоні термічного впливу, а також наведені залежності для визначення температури в довільній точці тіла.

На підставі виведених залежностей і складеної блок-схеми розрахунку створена комп'ютерна програма.

Ключові слова: плазма, зміцнення, джерело нагріву, модель, інструмент, клин.

Samotugin S.S., Mazur V.A., Litvinenko D.S. Modeling of plasma surface hardening of sharp cutting soil tool

A mathematical model of plasma hardening of sharp cutting soil tool was developed. The nature of heat propagation in the zone of thermal influence was shown, as well as the dependences for determining the temperature at any point of the body. Based on the derived dependencies and compiled by the flowchart of calculation a computer program was created. This program allows you to decide how to calculate the direct problem – calculation of the maximum heating temperature and cooling rate at given points of the product, and the reverse – the calculation of the required (optimal) treatment regimes that ensure the achievement of specified values of heating temperature at a given distance from the surface.

Keywords: plasma, hardening, heat source, model, tool, wedge.