

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ РЕЗЬБОНАРЕЗНОЙ ГРЕБЕНКИ

Плазменное поверхностное упрочнение, как один из методов поверхностной обработки источниками нагрева с высокой плотностью мощности, находит в настоящее время широкое и эффективное применение в условиях мелкосерийного, единичного (в том числе ремонтного), крупносерийного и массового производства. Для генерирования плазмы широко используют плазмотроны с открытой дугой, или прямого действия (положительный заряд подается на упрочняемую деталь), и плазмотроны с закрытой дугой (струей), или косвенного действия (отрицательный и положительный заряды подаются на детали плазмотрона — соответственно катод и анод) [1].

Важной характеристикой рассматриваемого процесса, существенно влияющей на поверхностное упрочнение, является температурное поле. На основе этой характеристики можно определить температуру материала в любой точке зоны термического воздействия в различные моменты времени, скорость нагрева и охлаждения, длительность пребывания нагретого металла в заданном интервале температур в зависимости от параметров режима обработки и теплофизических характеристик обрабатываемого материала.

Применение высокотехнологичных методов упрочняющей обработки направлено на обеспечение необходимого уровня эксплуатационных показателей работоспособности металлорежущего инструмента.

Повышение комплекса эксплуатационных свойств сталей при плазменном упрочнении осуществляется за счет более высокой степени растворения карбидной фазы и насыщения твердого раствора углеродом и легирующими элементами, измельчения зерна и блоков, повышения плотности дефектов кристаллического строения.

В результате многочисленных исследований установлено, что скорость охлаждения поверхностного слоя металла, структура и свойства упрочненной зоны определяются в первую очередь степенью локализации ввода тепла в обрабатываемое изделие (в пятно нагрева) [2]. От этого зависят и такие важные для практики факторы, как остаточные напряжения и деформации, необходимость применения дополнительных охлаждающих сред, производительность обработки, технико-экономические показатели.

Опыт использования плазменного упрочнения показывает, что термический цикл нагрева и охлаждения материалов наиболее удобно регулировать изменением таких параметров процесса, как ток дуги и скорость перемещения плазмотрона при постоянном оптимальном уровне других параметров (расход плазмообразующего газа и охлаждающей воды, расстояние от среза сопла до обрабатываемой поверхности).

Одним из эффективных методов исследования и оптимизации процессов плазменного упрочнения является использование компьютерного моделирования, при котором возможно получение максимального объема информации при минимуме дорогостоящих экспериментальных исследований [3].

Построение математической модели теплопередачи энергии плазменной струи нагреваемому телу сводится к определению граничных условий дифференциального нестационарного уравнения теплопроводности [4]. Применительно к плазменному упрочнению такие модели представлены в работе [5]. Однако, в литературе отсутствуют сведения об особенностях моделирования тепловых процессов при упрочнении резьбообразующего острогребенчатого инструмента вдоль рабочей кромки.

В общем случае рабочая часть резцообразующего 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» [6].

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 рис. 1.

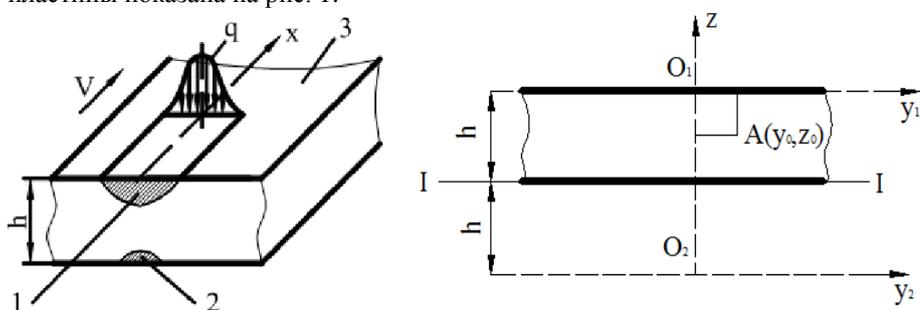


Рис. 1. Схема мощного быстродвижущегося нормально-кругового источника нагрева на поверхности пластины: q – мощность плазменного нагрева; h – толщина пластины; V – направление обработки; 1 – упрочненная зона; 2 – упрочненная зона от действия «фиктивного» источника нагрева; 3 – упрочняемое изделие; $I-I$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

Применительно к резбонарезной гребенке, характер распространения тепла усложнится из-за наклона нижней грани под углом α (рис. 2).

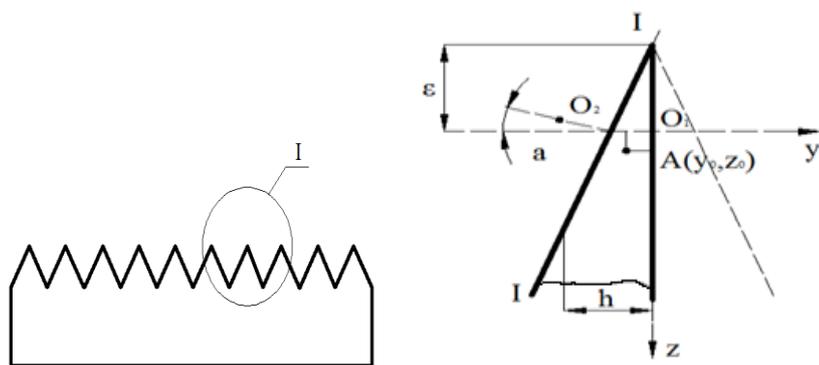


Рис. 2. Схема к расчету температурного поля при плазменном упрочнении резцообразующего инструмента на примере одной кромки

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 [7].

Температура от действительного источника нагрева учитывается уравнением [4]:

$$T_1(y_0, z_0, t) = \frac{2q}{VC\rho} \cdot \frac{e^{-\frac{z_0^2}{4at}}}{\sqrt{4\pi at}} \cdot \frac{e^{-\frac{y_0^2}{4a(t_0-t)}}}{\sqrt{4\pi a(t_0-t)}}. \quad (1)$$

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

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

Тогда суммарная температура от влияния обоих источников будет определяться как:

$$T_\Sigma = T_1(y_0, z_0, t) + T_2(y_0, z_0, t); \quad (3)$$

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

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

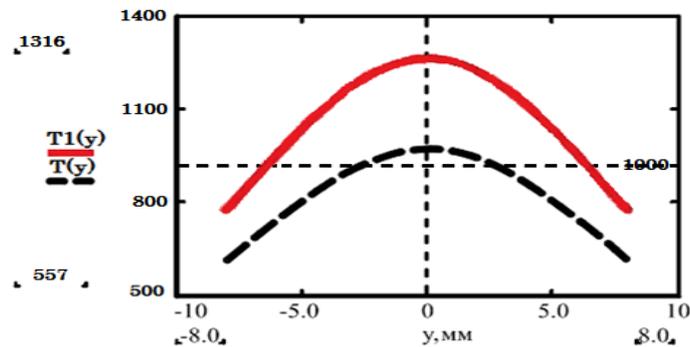


Рис. 3. Распределение температур в точке А с координатами (y_0, z_0) от действия высококонцентрированного плазменного источника: $T1$ - с учетом постоянства тепло-физических свойств упрочняемого материала, T – теплофизические свойства материала принимались зависимыми от температуры.

При помощи метода конечных элементов, вводя конструктивные и физические параметры инструмента, мы также можем определить температуру в упроченной зоне (рис. 4).

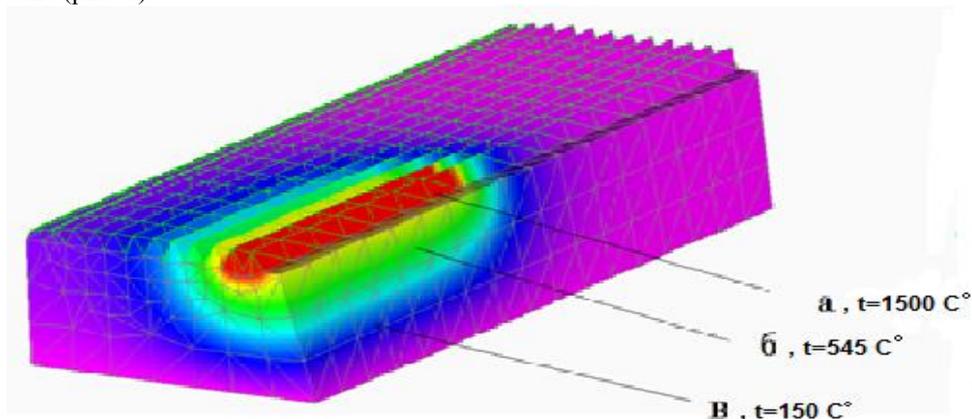


Рис. 4. Распределение температуры плазменного нагрева по глубине упроченной зоны Z : а – $z = 0,01$ мм; б – $z = 0,2$ мм; в – $z = 0,4$ мм.

ВЫВОДЫ

Разработанная математическая модель нагрева резбонарезного инструмента с достаточной точностью формализует физические механизмы теплопередачи между плазменной струей и поверхностью обрабатываемого инструмента. В виду конструктивных особенностей резбонарезной гребенки, компьютерное моделирование процесса позволяет с большой точностью определить температуру нагрева в произвольной точке.

Перечень ссылок:

1. Л.К. Лецинский Плазменное поверхностное упрочнение / Л.К. Лецинский, С.С Самотугин., И.И. Пирч, В.И. Комар - Киев: Техника, 1990. - 109 с.
2. Г.И. Лашенко Плазменное упрочнение и напыление / Г.И. Лашенко - Киев: "Экотехнология", 2003. - 64 с.

3. *С.П. Кундас, Б.А. Тонконогов, Т.А. Кашко* Компьютерное моделирование технологических процессов // Докл. Белорусского гос. ун-та информатики и радиоэлектроники. 2004. - № 3(7). - С. 38-49.

4. *Н.Н. Рыкалин* Расчеты тепловых процессов при сварке / *Н.Н. Рыкалин* – М.: Машгиз, 1951. – 296с.

5. *С.С. Самогугин* Плазменное упрочнение инструментальных материалов / *С.С. Самогугин, Л.К. Лецинский*. – Донецк: Новый мир, 2003.– 338 с.

6. *С.С. Самогугин* Математическое описание процессов распространения тепла в инструменте сложной формы от действия плазменного источника нагрева // *С.С. Самогугин, О. Ю. Нестеров, В. А. Мазур, В.В. Ананьева* - Вестник Инженерной академии наук Украины. – 2004. –№1. – С.101-107.

7. *С.С. Самогугин* Моделирование тепловых процессов при плазменном поверхностном упрочнении тонколезвийного почвообрабатывающего инструмента / *С.С. Самогугин, В. А Мазур, Д. С. Литвиненко* - Вестник СевНТУ: Серия «Машиноприборостроение и транспорт». – 2012. – Вип. 129. С. 194-198.

Рецензент: д.т.н., проф. Суглобов В.В.

Статья поступила 21.03.2014