

Хвисевич В.М., Якушевич С.

## К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Современное машиностроение предъявляет все более высокие требования к качеству деталей машин и режущего инструмента. Для таких изделий не только должна быть повышена производительность в процессе трения, но и достигнута хорошая сопротивляемость хрупкому разрушению. В этом случае наиболее подходящим способом является поверхностная термообработка, как наиболее полно обеспечивающая оптимальное сочетание необходимого уровня вязкости сердцевинные детали с высокой поверхностной твердостью. В числе новых развивающихся методов упрочнения является плазменная закалка. Этот способ заключается в локальном поверхностном упрочнении деталей при помощи быстро перемещаемого локального высокоинтенсивного плазменного источника тепла.

Поверхностное плазменное упрочнение деталей характеризуется рядом преимуществ [1-3]:

- высокой производительностью технологического процесса;
- созданием локального поверхностного упрочнения площадей, не подверженных растрескиванию, деформированию, отслаиванию;
- получением заданных свойств (механических, химических) обрабатываемых поверхностей;
- отсутствием деформаций обрабатываемых деталей, обусловленных локальностью термообработки.

Для локальной закалки высокоинтенсивным движущимся источником тепла с целью упрочнения поверхностного слоя деталей целесообразно нагревать его плазменно-дуговым способом (плазмотроном). Установка предлагаемая нами реализующая данный метод состоит из:

1. дугового плазмотрона;
2. силового источника электропитания постоянного и импульсного токов;
3. системы подачи рабочего газа – аргона и защитного газа – азота;
4. системы водоохлаждения плазмотрона;
5. установки для перемещения плазмотрона типа АСШ-70.

Плазмотрон состоит из вольфрамового катода диаметром 1,5мм и медного сопла с внутренним диаметром 2,2мм. Режим работы плазмотрона таков, что дуга горит между катодом и упрочняемой деталью, а сопло обеспечивает обжатие дуги и повышение температуры плазмы до 11000 – 15000К°.

Для оптимизации процесса закалки существенное значение имеет знание распространения полей температур и термонапряжений в нагреваемом теле.

Для определения полей температуры  $t(x, y, z)$  напомним дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$\operatorname{div} \lambda t \operatorname{grad} \lambda t - c(t) \frac{\partial t}{\partial \tau} = q(x, \tau). \quad (1)$$

Ставится следующая задача. В декартовых координатах  $XYZ$  задана область  $V$  в виде полупространства  $Z > 0$ . На граничной поверхности  $S$  расход тепла равен нулю:

$\frac{dt}{dn} = 0$ . По прямой линии, совпадающей с осью  $OY$ , дви-

жется со скоростью  $\bar{v}$  источник тепла, имеющий мощность  $q^*$ . Требуется найти температуру  $t(x, \tau)$ . В этом случае плотность  $q(x, \tau)$  источников может быть представлена функцией Дирака. Уравнение (1) переписывается в следующей форме:

$$\operatorname{div}[\lambda(t) \operatorname{grad} t] - c(t) \frac{\partial t}{\partial \tau} = -q^* \delta_i(z) \delta(x) \delta(y - v\tau), \quad (2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\delta(\xi)$  – функция Дирака,

$$\xi = z, x, y - v\tau, \quad \delta(z) = \frac{d\vartheta(z)}{dz}; \quad \delta(x) = \frac{d\vartheta(x)}{dx};$$

$\vartheta$  – ступенчатая функция Хевисайда:

$$\vartheta_i(\xi) = \begin{cases} 1, & \xi > 0 \\ 0, & \xi \leq 0 \end{cases}; \quad \vartheta(\xi) = \begin{cases} 1 & \xi > 0 \\ 1/2 & \xi = 0 \\ 0 & \xi < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Коэффициент теплопроводности  $\lambda(t)$  зависит от температуры  $t$ . Обозначим через  $\lambda_0$  значение  $\lambda$  при некоторой опорной температуре  $t_0$ . Введем еще обозначение  $T$  для так называемой переменной Кирхгофа, т.е.

$$T = \frac{1}{\lambda_0} \int_0^t \lambda(t) dt. \quad (4)$$

Для металлов коэффициент температуропроводности  $a \approx \frac{\lambda(t)}{c(t)}$ . Поэтому уравнение (2) можно преобразовать к следующему виду:

$$\nabla^2 T - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau} = -\frac{q}{\lambda_0} \delta_i(z) \delta(x) \delta(y - v\tau). \quad (5)$$

Выполним интегральное преобразование Фурье уравнения (5) по переменным  $x$  и  $y$  и преобразование Лапласа по времени  $\tau$ . В результате для трансформанты  $\tilde{T}$  температуры  $T$  получаем уравнение:

$$\frac{d^2 \tilde{T}}{dz^2} - \gamma^2 \tilde{T} = -\frac{q}{\lambda_0} \delta_i(z) \delta(y - v\tau) \frac{1}{\sqrt{2\pi}}, \quad (6)$$

*Хвисевич Виталий Михайлович. Зав. каф. сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.*

*Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.*

*Якушевич С. Директор предприятия по производству технологического оснащения Белостокского технического университета, Польша.*

где введены обозначения

$$\delta(y-v\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \delta(y-v\tau) e^{i\eta y - \alpha} ; \quad (7)$$

$$\gamma^2 = \xi^2 + \eta^2 + \frac{\vartheta}{a}.$$

Решение уравнения (6), удовлетворяющее условия  $\frac{dT}{dz} = 0$  тепловой изоляции на граничной поверхности  $z = 0$ , имеет такой вид:

$$\bar{T} = A e^{-\gamma z} + \frac{q}{\lambda_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \delta(y-v\tau) \frac{e^{-\gamma|z|}}{2\gamma}, \quad (8)$$

где обозначено:

$$A = \frac{q}{2\lambda_0 \sqrt{2\pi\gamma}} \delta(y-v\tau); \quad |z|_i = z \operatorname{sign}_i z, \quad (9)$$

$$\operatorname{sign}_i z = 2\vartheta_i(z) - 1; \quad (\operatorname{sign}_i z)_{z=0} = -1.$$

Теперь необходимо перейти от трансформанты  $\bar{T}$  к оригиналу  $T$ . Используем теорему о свертке для интегрального преобразования Фурье-Лапласа. В результате получим:

$$T = \frac{q}{8\pi\lambda_0} e^{-\frac{y\vartheta}{2a}} \times$$

$$\times \left[ e^{\frac{vR}{2a}} \operatorname{erfc} \left( \frac{R}{2\sqrt{a\tau}} + \frac{v\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}} \right) + e^{-\frac{vR}{2a}} \operatorname{erfc} \left( \frac{R}{2\sqrt{a\tau}} - \frac{v\sqrt{\tau}}{2\sqrt{a}} \right) \right] \quad (10)$$

Через  $\operatorname{erfc} \vartheta$  здесь обозначается интеграл, который связан с известным интегралом вероятности соотношением:

$$\operatorname{erfc} \vartheta = 1 - \operatorname{erf} \vartheta. \quad (11)$$

Кроме этого,

$$y_I = y - v\tau,$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \quad (12)$$

При квазистационарном тепловом режиме будет

$$T = \frac{q}{8\pi\lambda_0 R} e^{-\frac{y_I \vartheta}{2a}} \left[ e^{\frac{vR}{2a}} \cdot 0 + 2e^{\frac{vR}{2a}} \right] = \frac{q}{4\pi\lambda_0} e^{-\frac{y_I \vartheta}{2a} - \frac{vR}{2a}} =$$

$$= \frac{q}{4\pi\lambda_0 R} e^{-y\omega(y_I+R)},$$

где  $\omega = \frac{v}{2a}$

В случае  $\lambda = \text{const}$  решение (13) совпадает с известным из монографии Г. Паркуса [4].

Случай, когда термоупругая среда является однородной и изотропной с постоянными теплофизическими характеристиками рассмотрим, следуя Г. Паркусу, подробнее. Температура  $T$  подчиняется дифференциальному уравнению:

$$a\nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial \tau}; \quad a = \frac{\lambda}{c}. \quad (14)$$

Положим, что система координат движется с постоянной скоростью относительно тела, и рассмотрим, как изменится при этом уравнение теплопроводности (14).

Изменение температуры  $(\partial T / \partial \tau) d\tau$  за интервал времени  $d\tau$ , которое наблюдается в подвижной системе, складывается из двух составляющих. Первая составляющая возникает из-за нестационарности поля  $T$ , как это происходит и в неподвижной системе координат. Вторая составляющая возникает вследствие движения наблюдателя вместе с системой координат. За время  $d\tau$  будет пройдено расстояние  $d\bar{S} = \bar{v} d\tau$  и наблюдатель попадает в точку среды с другим значением температуры  $T$ . Вторая составляющая имеет, таким образом, значение  $d\bar{S} \cdot \nabla T = \bar{v} \cdot \nabla T d\tau$ , где  $\bar{v}$  - вектор скорости системы координат,  $\nabla T$  - градиент температуры в неподвижной среде.

При выводе уравнения теплопроводности (14) был составлен тепловой баланс в элементарном объеме среды. Этот баланс определяется только первой составляющей изменения температуры. Поэтому в подвижной системе нужно вычесть вторую составляющую из наблюдаемого изменения температуры. Тогда уравнение теплопроводности примет следующую форму:

$$a\nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial \tau} - \bar{v} \cdot \nabla T \quad (15)$$

Уравнение (15) остается верным, когда система координат совершает не только поступательное, но и вращательное перемещение, определяемое вектором  $\bar{\omega}$  упругой скорости. Тогда в уравнение (15) вместо  $\bar{v}$  нужно подставить  $\bar{v} = \bar{v}_0 + \bar{\omega} \times \bar{R}$ , где  $\bar{v}_0$  - скорость начала координат, а  $\bar{R}$  - радиус-вектор точки в подвижной системе.

Если в неподвижной системе  $(\partial T / \partial \tau) = 0$ , то температура  $T$  в неподвижной системе является стационарной, не зависящей от времени. В подвижных координатах она все равно будет зависеть от времени.

Будем говорить, что распределение температуры является квазистационарным в движущейся системе, если в ней температура  $T$  не будет зависеть от времени, т.е. если в уравнении (15) исчезает член  $\partial T / \partial \tau$ , при этом скорость  $\bar{v}$  также не зависит от времени.

При квазистатическом рассмотрении задач температурных напряжений динамические эффекты не принимаются во внимание. Соответствующие уравнения теории упругости не будут зависеть от движения системы координат и их можно использовать без изменения в подвижной системе координат.

Пусть на поверхности  $z = 0$  упругого полупространства  $z > 0$  движется равномерно и прямолинейно по оси  $y$  со скоростью  $\bar{v}$  точечный источник постоянной производительности  $q$ . Поверхность полностью теплоизолирована, т.е.  $\frac{dT}{dz} = 0$  при  $z = 0$ .

Полагаем, что начало координат движущейся вместе с источником системы, находится в источнике, а ось  $O_y$  совпадает с траекторией.

Если предположить, что процесс продолжается достаточно долго, т.е. что источник движется из положения  $y = -\infty$ , то для наблюдателя, находящегося в движущейся системе, распределение температуры и напряжений является стационарным. Следовательно, рассматриваемый процесс можно

считать квазистационарным. Уравнение теплопроводности принимает вид:

$$\nabla^2 T + 2\omega \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad (16)$$

Решение уравнения (16) имеет следующее выражение:

$$T = \frac{q}{4\pi\lambda R} e^{-\omega(y+R)}; \quad R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \quad (17)$$

Решение (17) удовлетворяет поставленному на границе области условию полной теплоизоляции. Действительно, вычислим производную:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{q}{4\pi\lambda R^3} z (1 + \omega R) e^{-\omega(y+R)}. \quad (18)$$

При  $z = 0$  выражение (18) обращается в нуль всюду, кроме начала координат.

Таким образом, с помощью формул (13), (17) можно оценить распределение температуры в теле.

Проведена серия экспериментов по определению твердости поверхности образцов из чугуна и стали, обработанных плазменно-дуговым способом и параметрами данного процесса являлись: скорость движения плазматрона, расход газа, величины тока и напряжения, твердость.

Наиболее оптимальными оказались: скорость движения плазматрона 6 мм/с; сила тока – 26А; напряжение 36В, расхода аргона составил – 14,0-22л/ч. При этом твердость поверхности чугуна после упрочнения составила в пределах 50 ÷ 58,5 HRC, тогда как, без закалки – 28 ÷ 35HRC.

При увеличении скорости движения плазматрона твердость уменьшалась. На основании проведенных исследований построен график зависимости поверхностной твердости металла от скорости перемещения плазматрона (рис. 1).

Таким образом, предлагаемый метод поверхностной закалки с помощью плазменного источника тепла позволил

повысить твердость чугуна в 1,5 ÷ 2,5 раза; СТ45 – в 2 раза, а износостойкость стали – в 1,4 ÷ 1,7 раза. В процессе закалки в качестве плазмообразующего газа использовался аргон.

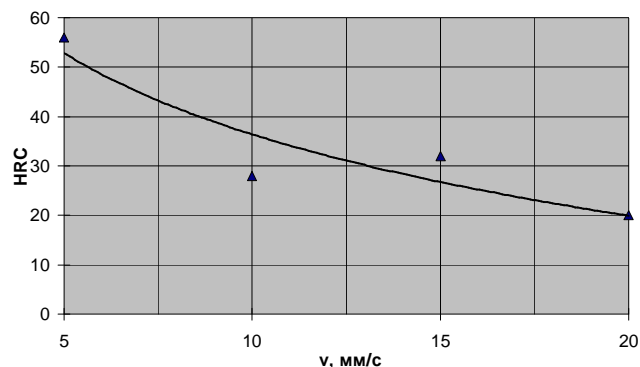


Рисунок 1 – Зависимость поверхностной твердости металла от скорости перемещения плазматрона.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рыкалин Н.Н., Углов А.Л., Зуев И.В., Кокова А.Н., Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. Справочник – М.: Машиностроение, 1985. – 496с.
2. Спиридонов Н.В., Кобяков О.С., Куприянов И.Л. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин.- Мн.: Выш. шк., 1988 – 155с.
3. Бураков В.А., Федосенко С.С., Формирование структур повышенной износостойкости при лазерной закалке металлообрабатывающего инструмента. // Металловедение и термическая обработка металлов.-1962.-№9.-С.33–36.
4. Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения. – М: Физматгиз. 1963. – 280С.

УДК 621.91-529: 62-19

**Горбунов В.П., Григорьев В.Ф.**

## БАЛАНС ПОГРЕШНОСТЕЙ ВЫХОДНОГО ПАРАМЕТРА МНОГОЦЕЛЕВОГО СТАНКА В СИСТЕМЕ ПРИВОД ПОДАЧ – ПОДВИЖНЫЙ РАБОЧИЙ ОРГАН

К подвижным рабочим органам станков – столу, салазкам, ползуну, несущим заготовку или инструмент, предъявляются особенно высокие требования как к точности траектории, так и к точности координатных перемещений. Последние, рассмотренные вдоль направления перемещения, определяют точностью позиционирования рабочего органа.

Современные многоцелевые станки (МС) с ЧПУ, предназначенные для обработки разнообразных, в том числе прецизионных деталей, имеют увеличенное число управляемых координат, автоматическую смену инструмента и обрабатываемых деталей, автоматический выбор режимов резания. Эти станки являются основным элементом многих гибких автоматизированных производств, поэтому их точность и надежность должны удовлетворять требованиям «безлюдной» технологии. Эксплуатация МС показала, что их конструкция должна обладать рядом особенностей, без учета которых программное управление процессом обработки малоэффективно. К ним относятся более высокие требования к жесткости конструкций приводов столов, салазок, предотвращения скачкообразности движения подач путем усовершенствования кон-

струкции направляющих и винтовых передач, разработка специальных систем смазывания, применение прогрессивных видов приводов подач и стабильных отсчетно измерительных систем.

К приводам подач предъявляются высокие требования по параметрам точности позиционирования с учетом минимального времени перемещения рабочего органа. При создании новых конструкций станков происходит, как правило, дальнейшее совершенствование механизмов и устройств, обеспечивающих движение рабочих органов и их координатное позиционирование. Все это необходимо для обеспечения высокой надежности работы станка [1].

Исходной информацией для определения показателей технологической надежности исследуемого МС по выходному параметру служит баланс погрешностей, полученный при экспериментальных исследованиях. Как было показано в [2], точность координатных перемещений МС определяется величинами погрешностей  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  данного выходного параметра на рассматриваемые оси координат станка. Оценка данных проекций выходного параметра ведется с учетом воз-

**Горбунов Виктор Петрович.** Доцент каф. машиноведения Брестского государственного технического университета.

**Григорьев Владимир Федорович.** Доцент каф. машиноведения Брестского государственного технического университета. Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.