

ленных. Это также подтверждается эксплуатационными испытаниями.

Искомое уравнение регрессии износа наплавленного и закаленного слоя имеет вид

$$I = 3,48 - 0,7v - 0,28p + 0,05pv + 0,35v^2 + 0,02p^2,$$

наплавленного и упрочненного ПВ ТМО

$$I = 2,71 - 0,54v - 0,09p + 0,03vp + 0,16v^2 + 0,005p^2.$$

К основным факторам, способствующим уменьшению скорости изнашивания цилиндрических деталей с наплавленным покрытием, подвергаемых ПВ ТМО, можно отнести измельчение карбидов, повышение плотности дислокаций, диспергирование структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н а л и м о в В.В., Ч е р н о в а Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М., 1965. – 398 с. 2. С а у т и н С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. – Л., 1974. – 47 с.

УДК 621.9.02 – 408.2

Г.М. ЮМШТЫК

К РАСЧЕТУ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ УПРОЧНЕНИИ В ВАКУУМЕ

Упрочнение металлорежущих инструментов, а также различных деталей машин и механизмов нанесением тонкопленочных износостойких покрытий в вакууме получило в последнее время широкое распространение. В основу данной технологии положен метод конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ) [1] при нагреве обрабатываемых изделий до температуры 400...600 °С. Однако вопросы установления оптимальной температуры нагрева цилиндрических деталей, например концевой инструмента, остаются весьма актуальными. Это связано с тем, что при работе установок по вышеуказанному методу часто наблюдается отпуск упрочняемых изделий, особенно мелкоразмерных. Последнее отрицательно сказывается на их работоспособности.

На ионную бомбардировку (очистку поверхности) затрачивается энергия, значительно большая, чем на конденсацию. Следовательно, она определяет степень нагрева упрочняемых изделий, а значит, и вероятность их отпуска.

Целью исследования являлась разработка методики определения температуры нагрева изделий с учетом кинематики их движения под испарителем, позволяющей оценить конструктивно-технологические возможности вакуумного оборудования и предотвратить отпуск упрочняемых изделий.

В основу расчета положено определение плотности теплового потока и закона распределения температуры по цилиндрической детали. На основании полученных зависимостей рассчитывается время достижения требуемой температуры нагрева и перепад температур изделия.

Процесс ионной бомбардировки деталей осуществляется ионным пучком при подаче на деталь потенциала порядка 1 кВ. При этом с ее поверхности удаляются загрязнения, а также происходит "залечивание" микродефектов. В результате взаимодействия быстрых ионов пучка с атомами поверхностного слоя часть кинетической энергии ионов переходит в теплоту, что приводит к нагреву детали.

При известном ионном токе I и напряжении U плотность теплового потока рассчитывается по формуле [2]

$$q_0 = \eta \frac{UI}{A},$$

где η — коэффициент аккомодации по энергии; A — площадь поверхности, обращенной к ионному потоку.

При упрочнении цилиндрических деталей на установках типа ВУ-1Б, "Пуск" с вертикальным направлением ионного потока используется внутрикамерная технологическая оснастка, в которой детали крепятся вертикально, т.е. площадь поверхности, обращенной к ионному потоку детали, равна площади ее торца.

При условии упругого соударения ионов с поверхностью детали [2]

$$\eta = \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2},$$

где M_1 и M_2 — масса иона и молекулы материала поверхностного слоя соответственно.

В предположении, что тепловой поток равномерно распределен по поверхности цилиндрической детали и теплоотводом в окружающую среду с ее боковых поверхностей можно пренебречь, а также, если $R/l \ll 1$, где R и l радиус и длина цилиндрической детали, распределение температур вдоль ее оси [3]

$$T(x, \tau) = \frac{2q_0\sqrt{\kappa t}}{\lambda} i\Phi^*\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) + T_0, \quad (1)$$

где κ , λ — коэффициенты температуропроводности и теплопроводности материала; $i\Phi^*\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right)$ — интеграл функции ошибок; T_0 — начальная температура детали.

Из соотношения (1) нетрудно определить время достижения заданной температуры нагрева торцевой поверхности детали:

$$\tau_0 = \frac{\pi\lambda^2(T_H - T_0)}{4\kappa q_0^2}, \quad (2)$$

где T_H — температура нагрева детали.

Время τ_1 достижения T_H , например на глубине $l/2$, можно определить из соотношения

$$T(l/2, \tau_1) = \frac{2q_0 \sqrt{\kappa\tau_1}}{\lambda} i \Phi^* \left(\frac{l}{4\sqrt{\kappa\tau_1}} \right) + T_0. \quad (3)$$

Перепирав (3) в виде, удобном для графического решения, получим

$$\frac{2\lambda(T_H - T_0)}{q_0 l} \frac{1}{z} = i \Phi^*(z),$$

где $z = l/(4\sqrt{\kappa\tau_1})$.

Следовательно,

$$\tau_1 \frac{l^2}{16z^2\kappa}. \quad (4)$$

Сравнив значения, полученные по формулам (2)–(4), с экспериментальными, нетрудно уточнить коэффициент аккомодации по энергии η . Как и следовало ожидать, продолжительность прогрева детали пропорциональна l^2/κ .

Перепад температур к моменту достижения T_H на поверхности детали можно определить из соотношения

$$\Delta T = T_H - T(l, \tau_0) = \frac{2q_0 \sqrt{\kappa\tau_0}}{\lambda} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} - i \Phi^* \left(\frac{l}{2\sqrt{\kappa\tau_0}} \right) \right]. \quad (5)$$

В случае, когда для упрочнения цилиндрических деталей используются установки типа "Юнион" с горизонтальным направлением ионного потока, в качестве технологической оснастки для крепления обрабатываемых деталей применяется приспособление планетарного типа. Детали расположены таким образом, что их оси перпендикулярны к направлению плазменного потока. Сами детали совершают планетарное движение. При этом их поверхность постоянно подвергается воздействию ионного пучка.

Распределение температуры в радиальном направлении цилиндрической детали с учетом принятого допущения об отсутствии теплопередачи в окружающую среду через ее торцы [3] определится выражением

$$T(r, \tau) - T_0 = \frac{2q_1 \kappa \tau}{\lambda R} + \frac{q_1 R}{\lambda} \left[\frac{r^2}{2R^2} - \frac{1}{4} - \right. \\ \left. - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left(- \frac{\kappa a_n^2 \tau}{R^2} \right) \frac{I_0(r a_n / R)}{a_n^2 I_0(a_n)} \right], \quad (6)$$

где $I_i(\alpha)$ – функция Бесселя; a_n – корни характеристического уравнения.

Из выражения (6), ограничиваясь первым членом ряда и при условии, что $\alpha_1 = 3,83$, нетрудно установить время достижения заданной температуры нагрева на поверхности цилиндрической детали с помощью соотношения

$$T_H - T_0 + \frac{2}{15} \frac{q_1 R}{\lambda} \exp(-15z) = \frac{2q_1 l}{\lambda} z + \frac{q_1 R}{2\lambda},$$

где $z = \kappa \tau_0 / R^2$.

Время полного нагрева детали

$$\tau_R \cong \frac{(T_H - T_0) \lambda R}{2q_1 \kappa}, \quad (7)$$

а перепад температур на образующей цилиндра и в его центре (сердцевине)

$$T_R - T_0 \cong \frac{1}{4} \frac{q_1 R}{\lambda}. \quad (8)$$

Из соотношений (5) и (8) следует, что перепад температур на поверхности детали прямо пропорционален плотности теплового потока, т.е. чем меньше тепловой поток, тем ниже перепад температур.

Выражения (2) и (7) показывают, что время нагрева детали убывает с ростом теплового потока.

Таким образом, на закон распределения температуры и продолжительность нагрева упрочняемых деталей существенное влияние оказывает их расположение по отношению к ионному потоку и характер движения в этом потоке.

Оценив конструктивно-технологические возможности существующего вакуумного оборудования по качеству производимой ионной очистки, можно сделать вывод о необходимости располагать обрабатываемые цилиндрические детали таким образом, чтобы обеспечивался более равномерный их разогрев ($\Delta T \rightarrow \min$). Такая задача может решаться при использовании внутрикамерной технологической оснастки, сообщающей в процессе упрочнения сложное движение (качательно-вращательное) цилиндрическим деталям (рис. 1).

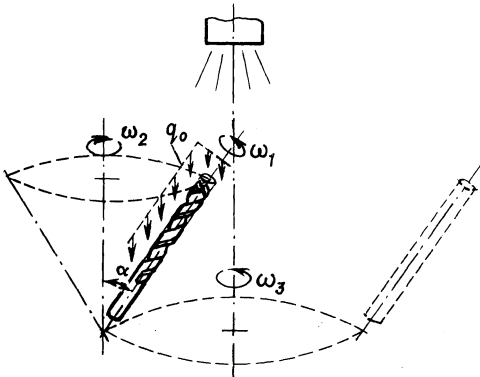


Рис. 1. Кинематика цилиндрических деталей при упрочнении

При ионной бомбардировке упрочняемых изделий необходимо, с одной стороны, как можно сильнее разогреть деталь для получения хорошей адгезии покрытия с основой, а с другой стороны, нельзя допустить ее перегрев (отпуск). Следовательно, для получения качественного покрытия на упрочняемых изделиях необходимо обеспечить их равномерный по всей поверхности нагрев до определенной температуры. Это условие может быть обеспечено соответствующим расположением и кинематикой движения изделия под испарителем, что достигается в вакуумных установках при использовании технологической оснастки.

Применение разработанной методики позволяет определять продолжительность нагрева цилиндрических деталей заданных размеров до необходимой температуры и анализировать равномерность ее распределения на изделиях, а также производить оценку конструктивно-технологических возможностей вакуумного оборудования. Исходя из размеров деталей и их материала можно выбирать схему движения упрочняемых цилиндрических деталей, объем их загрузки и необходимую для этого внутрикамерную технологическую оснастку.

ЛИТЕРАТУРА

1. В е р е щ а к а А.С., Т р е т ь я к о в И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. — М., 1986. — 192 с.
2. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой / Под ред. Р. Берша. — М., 1984. — 336 с.
3. К а р с л о у Г., Е г е р Д. Теплопроводность твердых тел. — М., 1964. — 488 с.