

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самсонов Г. В., Ковтун В. И. Механизм трения и изнашивания металлов // Физико-химическая механика материалов. — № 3. — 1975. — С. 38—41.
2. Оценка сопротивляемости схватыванию различных сплавов / Н.А. Буше, К.М. Раков, В.Я. Берент и др. // Вестник машиностроения. — № 4. — 1974. — С. 39—41.
3. Алгинов В. М., Марков А. А. К вопросу полуэмпирического определения поверхностной энергии твердых металлов и сплавов. Сб.: Поверхностные явления в расплавах. — Киев: Наукова думка, 1968. — С. 488.
4. Кунин Л. Л. Поверхностные явления в металлах. — М.: Metallurgizdat, 1955. — 492 с.
5. Кашеев В. Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. — М.: Машиностроение, 1978. — 214 с.
6. Кипарисов С. С., Левинский Ю. В. Азотирование тугоплавких металлов. — М.: Metallurgia, 1978. — 160 с.
7. Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах. — М.: Metallurgia, 1978. — 248 с.
8. Ковалев А. П. Кинетика и основные закономерности газонасыщения титановых сплавов / Научные труды МАТИ им. К.Э. Циолковского. — Вып. 4 (76). — М.: Изд-во «ЛАТМЭС», 2001. — С. 335—339.

620.10

## ТЕМПЕРАТУРА В КОНТАКТНОЙ ЗОНЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

*Канд. техн. наук Я.Н. ОТЕНИЙ*

*Рассматривается влияние всех составляющих, определяющих изменение температур в контактной зоне при пластическом деформировании.  
Решается задача учета таких составляющих.*

*Question of Influence of all components defining modification of temperatures in a contact zone at plastic deforming is examined.  
The problem of counting all these components is solved.*

Тепловые процессы при обработке деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД) роликами могут существенно повлиять на качество поверхностного слоя. Однако это будет происходить тогда, когда тепловое воздействие на контакт между роликом и деталью превысит определенный предел, при котором начнут возникать фазовые и структурные изменения в поверхностном слое. Существуют различные мнения о значениях температур, возникающих в контактной зоне при обработке ППД. Температура зависит от многих факторов: усилия деформирования, формы и размеров контактной зоны, скорости деформирования, проскальзывания, формы и размеров деформирующих роликов, характера и количества подводимой смазывающе-охлаждающей технологической среды. Учет всех составляющих на температуру в контактной зоне представляет собой сложную математическую задачу. Одним из путей ее решения является установление мощности тепловыделения через кинематику точек деформируемой поверхности с последующей связью кинематики с деформациями и напряжениями в контакте.

Будем предполагать, что: контактная зона представляет собой полосовой источник с геометрическими размерами, равными произведению полуширины контакта  $z_k$  на длину контактной зоны  $L_k$ ; почти вся расходуемая при упруго-пластическом деформирова-

нии мощность превращается в тепло; поверхность детали является адиабатической, т. е. все тепло распространяется в тело детали. При этих предположениях, очевидно, достигается максимально возможная температура на площади контакта. При тепловых расчетах будем использовать положения метода источников теплоты, приведенные в [1]. Количество теплоты, выделяемое в контактной зоне в единицу времени, можно разложить на две составляющие

$$Q_k = Q_{kd} + Q_{тр}, \quad (1)$$

где  $Q_{kd}$  — теплота, выделяемая при деформировании поверхности детали;  $Q_{тр}$  — теплота, выделяемая при проскальзывании ролика.

Количество тепла при пластическом деформировании (первая составляющая в формуле (1)) численно равно мощности, затрачиваемой на деформирование. Представим мощность деформирования элементарного участка поверхности контакта в виде

$$dQ_{kd} = v_i \sigma_i dS, \quad (2)$$

где  $v_i$  — скорость перемещения элементарной площадки  $dS$  в пределах контакта;  $\sigma_i$  — напряжение, действующее на этой площадке. Определим сомножители в (2).

Выберем на поверхности контакта точку  $M$  в произвольном сечении, перпендикулярном оси деформирующего ролика и расположенном в пределах контакта (рис. 1). Проведем в эту точку радиусы-векторы  $r_p$  и  $\rho_d$ , выходящие из центров сечения деформирующего ролика и детали.

На основе этой схемы приращение радиуса-вектора  $\rho_d$  при качении ролика по поверхности детали получено в виде

$$\Delta \rho_d = R_d - \sqrt{(R_d + r_p - h_p)^2 + r_p^2 - 2(R_d + r_p - h_p)r_p \cos \varphi_p}, \quad (3)$$

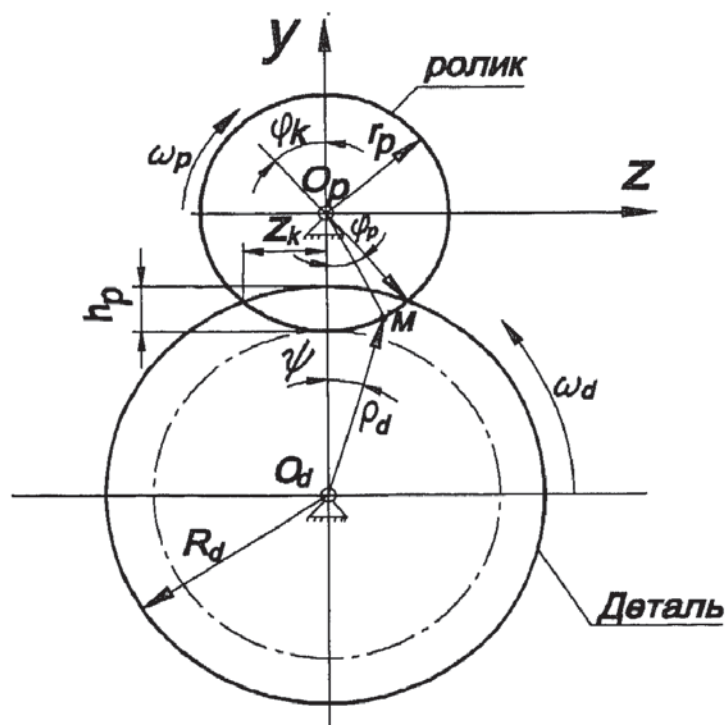


Рис. 1. Схема для определения кинематики точек деформируемой поверхности без учета проскальзывания

где  $R_d$  — радиус обрабатываемой детали;  $r_p$  — радиус деформирующего ролика;  $h_p$  — глубина внедрения ролика в поверхность детали;  $\varphi_p$  — изменение угла контакта по его полуширине.

$$\cos \varphi_p = \sqrt{1 - \left( \frac{z_k - z}{r_p} \right)^2}; \quad (0 = \varphi_p = \varphi_k), \quad (4)$$

где  $\varphi_k$  — максимальный угол контакта.

Относительная деформация радиуса-вектора  $\rho_d$  равна первой производной от текущей координаты полуширины контакта  $z$

$$\varepsilon_i = \frac{D(z_k - z)}{\rho_d r_p \sqrt{1 - \left( \frac{z_k - z}{r_p} \right)^2}}, \quad (5)$$

где принято обозначение  $D = R_d + r_p - h_p$ . Скорость перемещения той же площадки в зависимости от угла  $\omega_p$  равна

$$v_i = \frac{\omega_p D(z_k - z) z}{\rho_d}, \quad (6)$$

где  $\omega_p$  — угловая скорость вращения ролика.

Связь деформаций с напряжениями во многих случаях определяют из кривой упрочнения в виде [2, 3]

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^m, \quad (7)$$

где  $A$  и  $m$  — постоянные коэффициенты, зависящие от механических свойств обрабатываемого материала.

Выбрав на кривой упрочнения три точки, которые соответствуют началу координат, пределу текучести и пределу временного сопротивления обрабатываемого металла, численные значения которых известны из экспериментальных данных, можно составить систему из двух уравнений

$$\sigma_T = A \varepsilon_T^m \quad (8)$$

$$\sigma_B = A \varepsilon_B^m \quad (9)$$

где  $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$ ,  $\varepsilon_T$ ,  $\varepsilon_B$  — предел текучести, предел временного сопротивления, а также деформации, соответствующие пределу текучести и пределу временного сопротивления.

Совместное решение этих уравнений позволяет найти постоянные коэффициенты в (6)

$$m = \frac{\ln \left( \frac{\sigma_T}{\sigma_B} \right)}{\ln \left( \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_B} \right)}; \quad A = E \varepsilon_T^{1-m}. \quad (10)$$

Количество тепла, выделяемое в единицу времени, при поверхностном деформировании детали цилиндрическим роликом будет равна



$$Q_{kd} = A\omega_p L_k \int_0^{z_k} \left[ \frac{D(z_k - z)}{\rho_d r_p \sqrt{1 - \left(\frac{z_k - z}{r_p}\right)^2}} \right] \frac{D(z_k - z)}{r_p} dz. \quad (11)$$

Полученное значение количества теплоты распределяется на части площади поверхности детали, равной длине пути проходимой роликом в единицу времени, умноженной на длину контакта

$$S_p = v_p L_k = \omega_p r_p L_k, \quad (12)$$

где  $v_p$  — скорость качения ролика по детали.

Количество контактов, которые могут быть размещены на этой площади, равно

$$n_k = \frac{v_p}{z_k} = \frac{\omega_p r_p}{z_k}. \quad (13)$$

Следовательно, количество теплоты, приходящееся на площадь, занимаемую одним контактом, составит

$$Q_{k1} = \frac{Q_{kd}}{n_k} = \frac{Q_{kd} z_k}{\omega_p r_p}. \quad (14)$$

Удельное тепловыделение в контакте с учетом предыдущих формул будет равно

$$q_{k1} = \frac{Q_{k1}}{S_k t_k} = \frac{Q_{kd}}{S_k}, \quad (15)$$

где  $t_k$  — время прохождения роликом ширины контакта;  $S_k$  — площадь контакта, равная произведению длины контакта на его полуширину.

При обработке деталей накатыванием роликами источник тепловыделения является быстродвижущимся, оценку этого факта проводят с помощью безразмерного критерия Пекле

$$Pe = \frac{v_p z_k}{\omega_\Theta}, \quad (16)$$

где  $\omega_\Theta$  — коэффициент температуропроводности материала, по которому перемещается источник. Если  $Pe \geq 10$ , то источник относят к быстродвижущимся [1]. Расчеты показывают, что коэффициент Пекле при обработке ППД находится в пределах 400...750.

Вследствие высокой скорости движения время соприкосновения источника с элементом поверхности, равным ширине контакта, столь мало, что во всех точках контакта температуру можно считать одинаковой, а источник — двумерным мгновенным и полосовым. Поэтому с учетом приведенных выше формул максимальное значение температуры в площади контакта можно вычислить по формуле [1].

$$\theta = \frac{z_k q_{k1}}{\lambda \sqrt{\pi} \sqrt{Pe}}, \quad (17)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности обрабатываемого металла.

Из графиков (рис. 2), построенных на основе расчетов с помощью ПЭВМ, видно, что температура повышается с увеличением скорости перемещения ролика. Температура также зависит от радиуса деформирующего ролика: меньшему значению радиуса ролика соответствует меньшее количество тепла, выделяемого в контактной зоне при одной и той же глубине внедрения ролика. Это объясняется тем, что одновременно уменьшается усилие деформирования и площадь контакта при одной и той же глубине внедрения ролика в поверхность детали, соответственно уменьшается и удельное количество теплоты, приходящейся на единичный контакт.

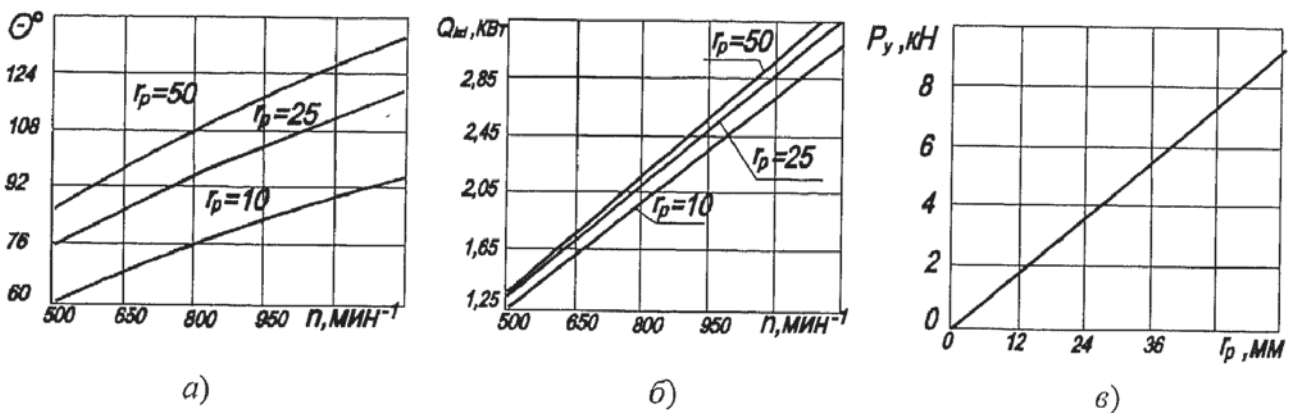


Рис. 2. Температура на поверхности контакта между деформирующим роликом и обрабатываемой поверхностью (а) (в зависимости от частоты вращения ролика), мощность тепловыделения в зависимости от частоты вращения ролика (б), усилие деформирования от радиуса ролика (в),  $h_p = 0,25$  мм;  $L_k = 10$  мм

Максимальное значение температуры при рассмотренных условиях деформирования не превышает 130 °С. Это ниже критического уровня температуры, при котором могут происходить существенные изменения в поверхностном слое детали. Кроме того, в процессе обработки применяют интенсивное охлаждение.

Вторую составляющую в уравнении определить значительно сложнее, так как до настоящего времени не установлены закономерности формирования проскальзывания ролика.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резников А. Н., Резников Л. А. Тепловые процессы в технологических системах. — М.: Машиностроение, 1990. — 288 с.
2. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. — М.: Машиностроение, 2002. — С. 299.
3. Кроха В. А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации: Справочник. — М.: Машиностроение, 1980. — 157 с.