

А.В. Королев, А. А. Королев, М.К. Решетников

ИМИТАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБКАТКОЙ В АБРАЗИВНОЙ СРЕДЕ

Определен съем припуска при использовании имитационной технологии абразивной обкаткой, который впервые учитывает число абразивных зерен на единице поверхности инструмента, параметры площадки контакта заготовки и инструмента, деформацию микронеровностей. Выполненные исследования выявляют механизм процесса абразивной обработки обкаткой и позволяют совершенствовать условия его осуществления.

A.V. Korolev, A.A. Korolev, M.K. Reshetnikov

PECULIARITY OF THE SIMULATION TECHNOLOGY WITH THE TREATMENT OF THE ABRASIVE MEDIUM

The removal of margin at the simulation technology with the treatment of the abrasive medium is determined; it takes into account for the first time the number of the abrasive grains on the surface of the tool, area parameters of prepared details contact and the tool, distortion of microprominence. Revealed regularities discover the mechanism of the process of the abrasive treatment and allow to improve the conditions of its performance.

Особенностью процесса обкатки в абразивной среде по сравнению с абразивной обработкой является то, что абразивные зерна под действием сил резания шаржируют в поверхность инструмента, удерживаются материалом инструмента, а их вершины царапают обрабатываемую поверхность заготовки. Глубина внедрения зерен в поверхность заготовки и число контактирующих с заготовкой зерен существенно зависит от шероховатости контактирующих поверхностей. К сожалению, это обстоятельство ранее совершенно не учитывалось.

На рис. 1 показана зона контакта поверхности заготовки с поверхностью инструмента в системе координат XOZ . За ось абсцисс OX принята средняя линия профиля инструмента, а за ось ординат OZ – нормаль к поверхности инструмента. Расстояние между средними линиями профилей заготовки и инструмента (z) характеризует степень сближения их поверхностей (ϵ). Под действием внешней нагрузки шероховатая поверхность заготовки взаимодействует с шероховатой поверхностью инструмента, в результате чего происходит упругая и пластическая деформация контактирующих микронеровностей.

На площадках контакта между микронеровностями заготовки и инструмента располагается абразивная паста (см. рис. 1). Абразивные зерна, содержащиеся в пасте, вдавливаются в поверхности заготовки и инструмента на глубину, обратно пропорциональную твердости. Часть зерен, особенно мелких, находящихся во впадинах микронеровностей инструмента, могут не касаться поверхности заготовки. Очевидно, чем больше шероховатость поверхности инструмента, тем меньшее число зерен будут контактировать с поверхностью заготовки, тем меньше будет производительность обработки.

В процессе перемещения инструмента относительно заготовки между их контактирующими поверхностями возникает микропроскальзывание. За счет этого абразивные зерна царапают поверхность заготовки и снимают припуск.

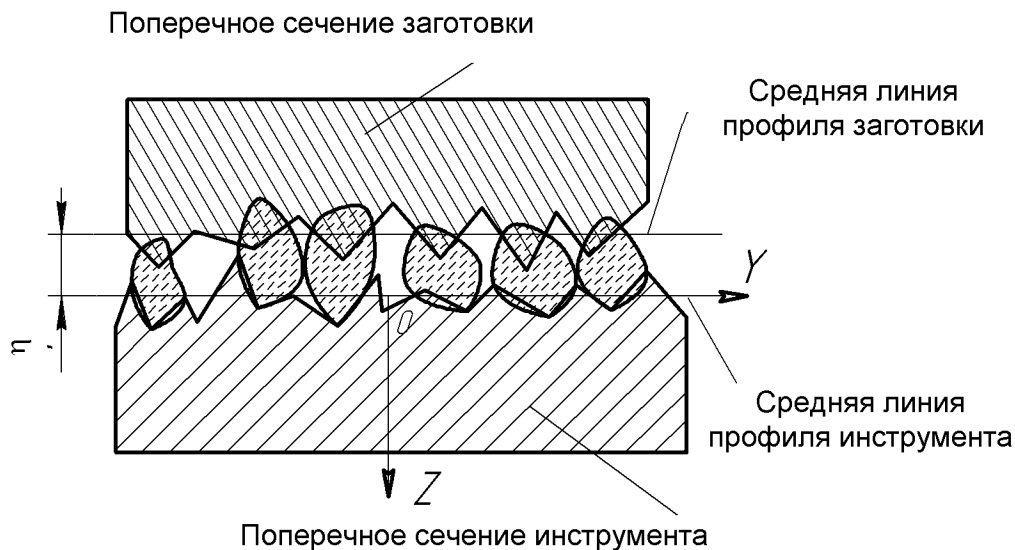


Рис. 1. Схема контакта поверхности заготовки с поверхностью доводочного инструмента

Величина снимаемого с заготовки припуска на элементарной полоске ∇x , расположенной в произвольном поперечном сечении заготовки на расстоянии x от начала координат, за время t равна:

$$q_x = \frac{\sum V_{it}}{\pi \cdot D_z \cdot \nabla x}, \quad (1)$$

где D_z – диаметр обрабатываемой поверхности заготовки; $\sum V_{it}$ – объем царапин от зерен на поверхности заготовки за время t .

Объем царапин от зерен за время t определяется произведением объема царапин за один контакт с инструментальным роликом на число таких контактов за это время:

$$\sum V_{it} = i_{kt} \cdot \sum V_{i1}, \quad (2)$$

где i_{kt} – число контактов произвольной точки поверхности заготовки с инструментальными роликами за время t ; $\sum V_{i1}$ – объем срезаемых стружек с поверхности заготовки за один контакт с инструментальным роликом.

В свою очередь число контактов произвольной точки поверхности заготовки с инструментальными роликами за время t равно:

$$i_{kt} = k \cdot n_{\Delta} \cdot t, \quad (3)$$

где k – число инструментальных роликов; n_{Δ} – относительная частота вращения заготовки и центра роликов.

Объем срезаемых стружек за один контакт с инструментальным роликом определяется выражением:

$$\sum V_{i1} = 2 \cdot z_o \cdot b_x \cdot \nabla x \cdot P_k \cdot V_i, \quad (4)$$

где z_o – число абразивных зерен, находящихся на единице поверхности инструментального ролика; b_x – полуширина полосы контакта инструментального ролика с поверхностью заготовки в поперечном сечении x ; P_k – вероятность контакта зерен, находящихся на поверхности инструментального ролика на площадке контакта, с поверхностью заготовки; V_{oi} – средний объем единичной царапины поверхности заготовки.

Подставляя выражения (2)-(4) в равенство (1), получим:

$$q_x = 2 \cdot k \cdot z_o \cdot \frac{b_x \cdot P_k \cdot V_i \cdot n_{\Delta} \cdot t}{\pi \cdot D_z} \quad (5)$$

Найдем последовательно входящие в равенство (5) значения параметров. Число зерен на единице поверхности инструмента и заготовки можно найти по методике, предложенной в работе [1]. Если объемный вес материала зерен обозначить через γ_3 , то вес одного зерна будет равен:

$$\gamma_3 = 0,52 d_o^3 \gamma_3,$$

где d_o – средний диаметр зерен.

Пусть в единице веса пасты на вес зерен приходится ζ -я часть. Тогда в единице веса пасты будет находиться число зерен, равное:

$$z_e = \frac{\zeta}{\gamma_3} = \frac{\zeta}{0,52 d_o^3 \gamma_3}.$$

Единица веса доводочной пасты в готовом виде составляет следующий объем:

$$V_{II} = \frac{\zeta}{\gamma^3} + \frac{1-\zeta}{\zeta}.$$

где γ_{IIp} – средний объемный вес прочих компонентов пасты (преимущественно масла).

Тогда в единице объема пасты будет находиться число зерен $z_{об}$, равное:

$$z_{об} = \frac{z_e}{V_{II}} = \frac{1}{0,52 d_o^3 \left[1 + \frac{\gamma_3}{\gamma_{IIp}} \left(\frac{1-\zeta}{\zeta} \right) \right]} \quad (6)$$

Если доводочная паста хорошо перемешана и наносится на поверхность доводочных роликов одним ровным слоем, из выражения (6) число зерен на единице поверхности доводочных роликов будет равно:

$$z_o = \sqrt[3]{z_{об}^2} = \frac{1,55}{d_o^2} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{1-\zeta}{\zeta} \cdot \frac{\gamma_3}{\gamma_{IIp}} \right)^{\frac{2}{3}}} \quad (7)$$

Среднее же расстояние между зернами определится из следующего выражения:

$$l_3 = \frac{1}{\sqrt[3]{z_{об}}} = 0,8 d_o \left(1 + \frac{\gamma_3}{\gamma_{IIp}} \cdot \frac{1-\zeta}{\zeta} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

Вероятность контакта зерен с поверхностью заготовки определим по форме полной вероятности:

$$P(z, d_z) = \sum_{d_z=d_{\min}}^{d_{\max}} P(d_z) \cdot P(d_z / z), \quad (9)$$

где $P(dz)$ – вероятность того, что на поверхности инструмента в зоне контакта с заготовкой имеется зерно размером dz ; $P(dz/z)$ – вероятность того, что это зерно занимает на поверхностях инструмента такое положение, при котором оно оставит след на поверхности заготовки; z – случайная величина расстояния неровностей профилей заготовки $z1$ и инструмента $z2$ в направлении нормали их поверхностей:

$$z = z1 - z2.$$

Так как z_1 и z_2 являются независимыми случайными величинами, то величина z является случайной функцией от этих величин. На основе закономерностей теории случайных функций найдем плотность вероятностей распределения величины z :

$$f(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f(z_1) \cdot f_{z_2}(z + z_1) \cdot dz_1, \quad (10)$$

где $f(z_1)$ – плотность вероятностей распределения значений ординат неровностей связки; $f_{z_2}(z+z_1)$ – плотность вероятностей распределения значений ординат неровностей поверхности заготовки $z_2=z+z_1$.

Зерно размером dz может оставить царапину на поверхности заготовки, если оно занимает такое положение на неровностях доводочного ролика, при котором $(z-dz) < 0$. Так как размеры зерен и ординаты неровностей контактирующих поверхностей заготовки и инструмента независимые величины, то

$$P(d_z / z) = \int_0^{d_z} f(z) dz. \quad (11)$$

Если плотность вероятности распределения диаметральных размеров зерен в доводочной пасте обозначить через $f(d_z)$, то согласно определению вероятности имеем:

$$P(d_z) = f(d_z) d d_z. \quad (12)$$

С учетом выражений (11) и (12) равенство (9) примет вид:

$$P(z, d_z) = \sum_{d_z=d_{\min}}^{d_{\max}} f(d_z) \cdot d d_z \cdot \int_0^{d_z} f(z) dz. \quad (13)$$

При большом числе контактирующих с поверхностью заготовки абразивных зерен от суммирования в выражении (2.13) можно перейти к интегрированию:

$$P(z, d_z) = \int_0^{\infty} f(d_z) \cdot d d_z \cdot \int_0^{d_z} f(z) dz. \quad (14)$$

Выражение (14) представлено в общем виде. Подставив в это выражение значения плотностей вероятности распределения диаметральных размеров зерен и расстояний между неровностями заготовки и инструмента, можно получить частные решения. Например, практика показывает, что диаметральные размеры зерен распределяются по закону Гаусса:

$$f(d_z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_d} \cdot e^{-\frac{(d_z - d_0)^2}{2 \cdot \sigma_d^2}}. \quad (15)$$

Распределения ординат микронеровностей поверхностей инструмента и заготовки также обычно подчиняются нормальному закону. Как известно, композиция нормальных законов распределения соответствует нормальному закону. Поэтому

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_z} \cdot e^{-\frac{(z - z_s)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}}, \quad (16)$$

где σ_z – среднее квадратическое отклонение значений ординат расстояний между смежными точками микронеровностей заготовки и инструмента, равное:

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2}, \quad (17)$$

σ_{z_1} и σ_{z_2} – средние квадратические отклонения распределения значений ординат микронеровностей инструмента и заготовки; z_s – среднее значение расстояний между смежными точками микронеровностей заготовки и инструмента.

Из работы [2]

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{\pi}{2}} R_a ,$$

где R_a – среднее квадратическое отклонение микронеровностей поверхности.

Очевидно, что в начальный момент контакта среднее значение расстояния между микронеровностями заготовки и инструмента можно принять равным:

$$z_s = 3 \cdot (\sigma_{z1} + \sigma_{z2}) . \tag{18}$$

Подставив значения плотностей вероятностей распределения размеров абразивных зерен (15) и расстояний между микронеровностями поверхностей заготовки и инструмента (16) в равенство (14), найдем вероятность контакта зерен с поверхностью заготовки и инструмента:

$$P_k = P(z, d_z) = \frac{1}{2\pi\sigma_z \cdot \sigma_d} \cdot \int_0^\infty e^{-\frac{(d_z-d_o)^2}{2\sigma_d^2}} \cdot dd_z \cdot \int_0^{d_z} e^{-\frac{(z-z_s)^2}{2\sigma_z^2}} \cdot dz . \tag{19}$$

Используя равенство (19) при условиях (17) и (18) и принимая $\sigma_d=0,33d_o$, определим значения вероятностей P_k , представленных в табл. 1.

Таблица 1

Значение вероятности P_k

z/σ_z $\sigma d/\sigma_z$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
0	0,500	0,308	0,159	0,067	0,023	0,006	0,001
0,5	0,764	0,674	0,594	0,494	0,403	0,314	0,232
1,0	0,908	0,868	0,813	0,751	0,671	0,596	0,498
2	0,981	0,972	0,959	0,942	0,920	0,891	0,854

Здесь σd – среднее квадратическое отклонение размеров зерен; σ_z – среднее квадратическое отклонение величины z .

Значение вероятности контакта абразивных зерен с поверхностью заготовки, определяемое равенством (19), справедливо только при малых нагрузках на поверхность контакта инструмента и заготовки, когда деформация микронеровностей мала по сравнению с их высотой. С увеличением деформации микронеровностей поверхностей на площадке контакта вероятность контакта абразивных зерен с поверхности заготовки возрастает.

Если деформация микронеровностей при контакте заготовки и инструмента значительна по сравнению с высотой микронеровностей, то плотность вероятностей распределения ординат микропрофиля поверхности будет соответствовать усеченному закону нормального распределения:

$$f(z) = \frac{A_z}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \cdot e^{-\frac{(z-z_s)^2}{2\sigma_z^2}} \quad \text{при } 0 < z \leq z_{\max} , \tag{20}$$

где

$$A_z = \frac{1}{0,5 + F(z_{\max} / \sigma_z)} , \tag{21}$$

$$F(z_{\max}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_z} \cdot \int_0^{z_{\max}/\sigma_z} e^{-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}} \cdot dz .$$

В равенствах (16) z_{\max} – максимальное расстояние между смежными точками микронеровностей поверхностей инструмента и заготовки. Если принять поле рассеивания микронеровностей как для любого нормального процесса равным $6\sigma_z$, то с учетом деформации микронеровностей в процессе контакта заготовки и инструмента

$$z_{\max} = 6 \cdot \sigma_z - \varepsilon_{xy},$$

где ε_{xy} – величина деформации микронеровностей при контакте поверхностей.

Подставляя равенства (15) и (20) в (14), найдем вероятность контакта абразивных зерен с поверхностью заготовки с учетом деформации микронеровностей:

$$P(z, d_z) = \frac{A_z}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_z \cdot \sigma_d} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(d_z - d_0)^2}{2\sigma_d^2}} \cdot dd_z \cdot \int_0^{d_z} e^{-\frac{(z - z_s)^2}{2\sigma_z^2}} dz. \quad (22)$$

Значения $P(z, d_z)$ легко определяются с помощью программных средств.

Величина деформации неровностей рабочей поверхности инструмента будет зависеть от усилия его прижима к поверхности заготовки и шероховатости рабочей поверхности инструмента. Обычно шероховатость поверхности заготовки более чем на порядок меньше шероховатости рабочей поверхности инструмента. Это, например, подтверждено результатами экспериментальных исследований, представленных в табл. 2.

Таблица 2

Изменение шероховатости поверхности инструмента и заготовки
в процессе элеваторной доводки шариков

Степень точности	Шероховатость поверхности, мкм		
	доводочных дисков		шариков
	R_a	R_z	R_a
60 (III)	2,0; 2,5; 2,5	14; 14; 18	0,14±0,13
40 (II)	2,7; 2,8; 2,5	14; 16; 14	0,08±0,07
20÷28 (I)	2,4; 2,4; 2,4	12; 14; 15	0,05±0,05
10÷16 (0)	2,2; 2,2; 2,4	12; 12; 13	0,03±0,03
5 (01)	1,0; 1,0; 1,2	8,0; 7,0; 9,0	0,02±0,02
5 (02)	0,9; 1,0; 1,2	6,0; 8,0; 7,0	0,02±0,02

Как видно из табл. 2, при получении шариков высших степеней точности максимальная высота микронеровностей R_{\max} поверхности дисков составляет 6-8 мкм. Указанный вывод относится не только к процессу доводки шариков, но практически ко всем методам доводки.

Поэтому вследствие малой величины шероховатости поверхности заготовки влиянием ее на фактическую площадь контакта с рабочей поверхностью доводочного инструмента в процессе доводки можно пренебречь. Из-за невысокой скорости инструмента в процессе доводки влияние гидродинамического эффекта в зоне контакта заготовки и инструмента, а также влияние сил внедрения абразивных зерен в поверхность заготовки на величину сближения поверхностей заготовки и инструмента также не учитываем.

Найдем значение величины деформации микронеровностей в процессе контакта заготовки с рабочей поверхностью инструмента. Вначале для простоты рассмотрим поверхность заготовки абсолютно гладкой, поверхность же рабочей поверхности инструмента шероховатой. Примем условно поверхность заготовки криволинейной, а поверхность инструмента плоской. Под действием силы сжатия между заготовкой и инструментом $P_{\text{ш}}$ происходит деформация неровностей инструмента (рис. 2).

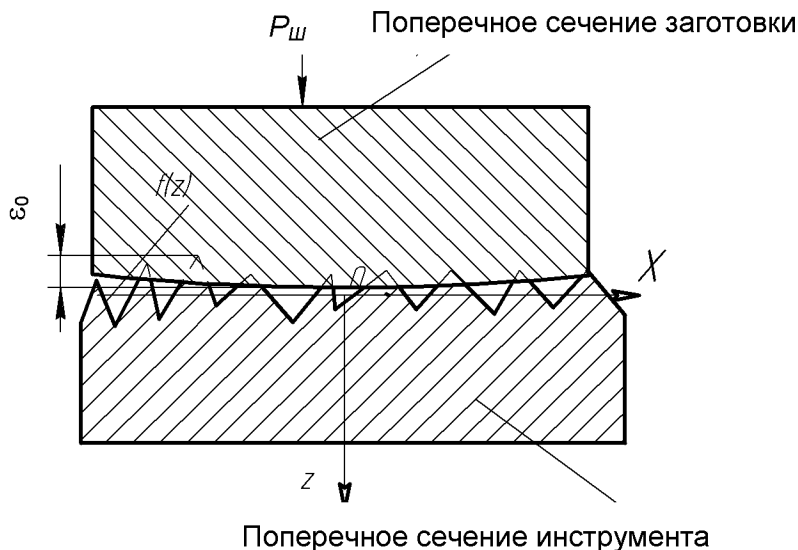


Рис. 2. Сечение заготовки и инструмента в направлении OX

Построим криволинейную систему координат, взяв за ось OX среднюю линию микронеровностей инструмента в направлении качения заготовки, за ось OY – среднюю линию микронеровностей инструмента в поперечном направлении, за ось OZ – нормаль к поверхностям заготовки и инструмента, проходящую через центр симметрии их площадки контакта. Величина деформации микронеровностей инструмента в произвольной точке M(x,y) вдоль оси OZ будет представлять собой сближение микронеровностей поверхностей инструмента и заготовки ε_{xy} .

По данным работ [2-4] в общем виде величину сближения шероховатых поверхностей при упругом контакте микронеровностей в зависимости от контурного давления можно выразить степенной зависимостью:

$$\varepsilon_{xy} = N_{\varepsilon} \cdot p_{xy}^{2/2\nu+1} \cdot p_{xy}^{2/2\nu+1}, \quad (23)$$

где ε_{xy} – величина деформации микронеровностей в точке (x,y); ν – показатель степени; N_{ε} – коэффициент, зависящий от механических и геометрических свойств контактирующих микронеровностей; p_{xy} – контурное давление на контакте; ν – упругая постоянная, равная

$$\nu = \frac{1 - \mu^2}{E},$$

μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости материала инструмента.

Величину коэффициента N_{ε} в выражении (23) для случая упругого контакта микронеровностей можно определить по данным работы [3]:

$$N_{\varepsilon} = \left(\frac{0,75 \cdot \pi^2 \cdot \rho^{0,5} \cdot R_{\max}^{\nu}}{K_{\nu} \cdot \pi \cdot \nu \cdot (\nu - 1) \cdot \eta} \right)^{2/2\nu+1}, \quad (24)$$

где K_{ν} – коэффициент, зависящий от ν (при $\nu=1,5$ $K_{\nu}=0,4$; при $\nu=2,5$ $K_{\nu}=0,12$); η – коэффициент, характеризующий форму кривой опорной поверхности); ρ – радиус округления вершин микронеровностей; R_{\max} – максимальная высота микронеровностей.

Для случая пластического контакта по данным работы [3] имеем:

$$\varepsilon_{xy} = \left(\frac{P_{xy}}{\eta \cdot \sigma_k} \right)^{\frac{1}{\nu}}, \quad (25)$$

где σ_k – напряжения пластической деформации микронеровностей, зависящие от твердости материала поверхностей.

Из двух значений ε_{xy} , подсчитанных исходя из упругого и пластического контакта микронеровностей, принимают меньшее значение.

Необходимые данные для расчета параметров микрорельефа поверхности можно определить из табл. 3.

Таблица 3

Параметры микрорельефа поверхностей стальных деталей [3]

Вид обработки	R_a , мкм	R_{max} , мкм	ρ , мкм	η	v
Круглое шлифование	1,25	9,38	8	0,6	2
	0,63	4,72	12	0,9	1,95
	0,32	2,4	20	1,27	1,9
	0,16	1,2	30	2	1,9
Внутреннее шлифование	2,5	18,75	5	0,65	2
	1,25	9,37	8	0,9	1,9
	0,63	4,72	13	1,1	1,85
	0,32	2,4	18,5	1,35	1,75
Плоское шлифование	2,5	18,75	100	0,9	1,95
	1,25	9,37	180	0,95	1,85
	0,63	4,72	370	1,6	1,8
	0,32	2,4	550	2,3	1,65
Суперфиниширование, хонингование	0,63	4,72	15	0,75	1,8
	0,32	2,4	20	1	1,75
	0,16	1,2	35	1,95	1,6
	0,08	0,6	70	2,5	1,5

Представленные выше выражения (23)-(25) для определения деформации микронеровностей заготовки и инструмента справедливы также и для случая, когда инструмент имеет криволинейную форму шероховатость поверхности заготовки соизмерима с шероховатостью поверхности инструмента.

Если все параметры микропрофиля заготовки обозначить индексом 1, а все параметры микропрофиля инструмента индексом 2, то в формулах (23)-(25) параметры контакта поверхностей определяются по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned}
 R_{max} &= R_{1max} + R_{2max} ; \\
 \vartheta &= \vartheta_1 + \vartheta_2 = \frac{1-\mu_1^2}{\pi \cdot E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{\pi \cdot E_2} ; \\
 v &= \sqrt{v_1^2 + v_2^2} ; \\
 \rho &= \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} ; \\
 \eta &= \frac{K_2 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot R_{max}^v}{R_{max1}^{v1} \cdot R_{max2}^{v2}} .
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

Значения K_2 в формуле (26) определяются из табл. 4 в зависимости от значений v_1 и v_2 .

Таблица 4

Значения коэффициента K_2

v_1	v_2		
	0,5	1,5	2,5
0,5	0,50	0,33	0,25
1,5	0,33	0,16	0,10
2,5	0,25	0,10	0,05

Если заготовка и инструмент имеют разную твердость, то в формуле (21) следует использовать меньшее из этих значений.

В формулах (23) и (25) присутствует величина давления p_{xy} в окрестности произвольной точки площадки контакта с координатами x, y . Найдем это давление.

По формулам теории упругости находим размеры малой и большой полуосей площадки контакта инструмента и заготовки [5-7]:

– для эллиптической площадки контакта

$$b = \mu_b \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot P_z \cdot \vartheta}{2 \cdot \sum k_r}}; \quad (27)$$

$$a = b \cdot \sqrt{1 - e_s^2};$$

– для прямоугольной площадки контакта

$$b = \sqrt{\frac{2 \cdot P_z \cdot \vartheta \cdot D_z \cdot D_r}{\pi \cdot (D_z \pm D_r) \cdot l_r}}; \quad (28)$$

где P_z – внешняя нагрузка на контакт; b и a – соответственно малая и большая полуоси площадки контакта; l_r – длина роликового инструмента; μ_b и e_s – коэффициент и эксцентриситет площадки контакта, зависящие от значения вспомогательных коэффициентов

$$\cos \tau = \frac{-\frac{1}{r_z} - \frac{1}{r_r} \pm \frac{2}{D_z} + \frac{2}{D_r}}{\sum k_r}; \quad (29)$$

$$\sum k_r = \frac{1}{r_z} + \frac{1}{r_r} \pm \frac{2}{D_z} + \frac{2}{D_r}.$$

В равенствах (28) и (29) r_z и r_r – радиусы профиля соответственно заготовки и инструмента, D_z и D_r – диаметры поверхностей соответственно заготовки и инструмента в плоскости качения. Знак «плюс» относится к случаю, когда заготовкой является внутреннее кольцо, знак «минус» относится к случаю, когда заготовкой является наружное кольцо. При $r_z = \infty$ и $r_r = \infty$ получаем контакт двух цилиндров, для которых

$$\cos \tau = 1;$$

$$\sum k_r = 2 \cdot \frac{D_z \pm D_r}{D_z \cdot D_r}.$$

Контактное напряжение в произвольной точке площадки контакта:

– для круговой площадки контакта

$$p_{xy} = p_o \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}} ; \quad (30)$$

$$p_o = \frac{3 \cdot P_k}{2 \cdot a \cdot b} ;$$

– для прямоугольной площадки контакта

$$p_y = p_o \cdot \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}} ; \quad (31)$$

$$p_o = \frac{2 \cdot P_k}{\pi \cdot l_r \cdot b} ,$$

где p_o – максимальное напряжение, возникающее по центру площадки контакта.

При цилиндрической форме заготовки и инструмента с параллельными осями контактное напряжение не зависит от координаты x .

Сближение заготовки и инструмента под действием внешней нагрузки:

– для эллиптической площадки контакта

$$\delta = \frac{K(e) \sqrt{1 - e_s^2}}{\pi \cdot \mu_b} \cdot \sqrt[3]{\frac{9}{4} \cdot \vartheta^2 \cdot \sum k \cdot P_k^2} ; \quad (32)$$

– для прямоугольной площадки контакта

$$\delta = \frac{P_r \cdot \vartheta}{\pi \cdot l_r} \cdot \left(\ln \frac{D_z \cdot D_r}{b^2} - 0,814 \right) , \quad (33)$$

где $K(e)$ – полный эллиптический интеграл первого рода.

В формуле (5) присутствует размер площадки контакта в направлении качения b_x с координатой x . Для случая контакта заготовки и инструмента цилиндрической формы с параллельными осями $b_x = b$ и не зависит от абсциссы x .

При контакте заготовки и инструмента с выпуклым профилем

$$b_x = b \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} . \quad (34)$$

Если заготовка и инструмент имеют цилиндрическую форму, но их оси не параллельны, а скрещиваются под углом α_r , то при их контакте образуется эллиптическая площадка контакта, а при расчетах по формулам (27), (29), (30), (32) и (34) следует использовать следующие значения радиусов кривизны профиля поверхностей контакта:

$$r_z = \frac{D_z}{2 \cdot \sin \frac{\alpha_r}{2}} ; \quad (35)$$

$$r_r = \frac{D_r}{2 \cdot \sin^2 \frac{\alpha_r}{2}} .$$

Используя выражения (22), (23), (30) и (31), можно определить усредненное значение вероятности P_k контакта абразивных зерен с поверхностью заготовки вдоль полоски контак-

та с абсциссой x , присутствующей в формуле (5). Для этого найдем усредненное значение деформации микронеровностей на площадке контакта. Подставив в равенство (23) выражение (30) или (31) и проинтегрировав его вдоль оси полоски контакта, найдем:

$$\varepsilon_x = N_\varepsilon \cdot \vartheta^{2/2\nu+1} \cdot p_o^{2/(2\nu+1)} \cdot \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right)^{1/(2\nu+1)} \cdot K_x, \quad (36)$$

где

$$K_x = \frac{1}{2} \cdot \int_0^1 u^{-\frac{1}{2}} \cdot (1-u)^{\frac{1}{2\nu}+1} du = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{2\nu+2}{2\nu+1}\right)}{\Gamma\left(\frac{3\nu+2,5}{2\nu+1}\right)}. \quad (37)$$

В равенстве (37) величина $\Gamma(x)$ представляет собой табулированную гамма-функцию.

Равенство (36) справедливо для эллиптической площадки контакта. Для прямоугольной площадки контакта средняя величина деформации микронеровностей не зависит от значения x и равна:

$$\varepsilon_x = N_\varepsilon \cdot \vartheta^{2/2\nu+1} \cdot p_o^{2/(2\nu+1)} \cdot K_x. \quad (38)$$

Значение величины K_x для различных значений ν представлено в табл. 5.

Таблица 5

Зависимость значения коэффициента нагрузки K_x от значений показателя формы микронеровностей ν

ν	1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
K_x	0,84	0,87	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95

Как видно из табл. 5, значение коэффициента K_x слабо зависит от значений ν и при больших значениях ν его можно принять равным единице.

Вычислив значение ε_x по формуле (36) или (38), определим значение P_k в равенстве (5):

$$P_k = P(z, d_z), \quad (39)$$

где величина $P(z, dz)$ находится по формуле (22) при

$$A_z = \frac{1}{0,5 + F(z_{\max} / \sigma_z)}, \quad (40)$$

$$F(z_{\max}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_z} \cdot \int_0^{(3\sigma_z - \varepsilon_x) / \sigma_z} e^{-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}} \cdot dz.$$

Определим значение относительной частоты вращения центра роликов и заготовки n_Δ равенства (5). Для этого воспользуемся зависимостями, приведенными в работе [5]. С учетом того, что при вращении заготовки центры инструментальных роликов также перемещаются вокруг ее оси, величина n_Δ равна:

$$n_\Delta = \frac{1}{2} \cdot |n_n - n_v| \cdot \left(1 \pm \frac{D_r}{D_z \pm D_r}\right), \quad (41)$$

где n_n и n_v – частота вращения соответственно наружного и внутреннего кольца.

Знак «плюс» в равенстве (41) используется, если в качестве заготовки рассматривается внутреннее кольцо, знак «минус» – если в качестве заготовки рассматривается наружное кольцо.

Наконец, для того, чтобы воспользоваться равенством (5), остается определить среднее значение объема царапины V_{oi} , оставляемой абразивными зернами на поверхности заготовки. Объем единичной царапины равен

$$V_i = S_i \cdot l_i, \quad (42)$$

где S_i – поперечное сечение царапины; l_i – длина царапины.

Площадь поперечного сечения одной царапины зависит от геометрической формы рабочей части зерен и глубины их внедрения в поверхность заготовки. Экспериментальные исследования геометрической формы зерен дают противоречивые результаты относительно параметров их режущей части и радиуса округления при вершине. Аналитические же исследования [1] показали, что геометрическая форма режущей части зерен близка к параболе, а соотношение между ее шириной b и высотой a имеет следующий вид:

$$b_i = 3,8 \cdot a_i, \quad (43)$$

где a_i – глубина царапины.

Площадь же поперечного сечения царапины от единичного зерна также можно определить из работы [1]:

$$S_i = 2,53 \cdot a_i^2. \quad (44)$$

Определим длину царапины:

$$l_i = b_i + v_{\Delta} \cdot t_i = 3,8 \cdot a_i + v_{\Delta} \cdot t_i, \quad (45)$$

где v_{Δ} – скорость микропроскальзывания поверхностей инструментального ролика и заготовки в зоне контакта; t_i – время непрерывного контакта абразивного зерна с заготовкой.

Время контакта абразивного зерна с поверхностью заготовки равно:

$$t_i = \frac{b}{\pi \cdot (D_z \pm D_r) \cdot n_{\nabla}}. \quad (46)$$

В равенстве (46) знак «плюс» используется в случае, если заготовкой является внутреннее кольцо, и знак «минус» – если заготовкой является наружное кольцо.

Скорость микропроскальзывания контактирующих поверхностей заготовки и инструментального ролика зависит от упругой деформации контактирующих поверхностей:

$$v_{\Delta} = 2 \cdot \pi \cdot \delta_{\Sigma} \cdot n_z, \quad (47)$$

где δ_{Σ} – суммарная деформация микронеровностей $\varepsilon_o = \varepsilon_{x=0}$ и поверхностей заготовки и инструмента δ в центре площадки контакта:

$$\delta_{\Sigma} = \delta + \varepsilon_o. \quad (48)$$

Подставляя равенства (46) и (47) в выражение (45), получим:

$$l_i = 3,8 \cdot a_i + 2 \cdot \delta_{\Sigma} \cdot n_z \cdot \frac{b}{(D_z \pm D_r) \cdot n_{\nabla}}. \quad (49)$$

Используя равенства (44) и (49), преобразуем выражение (42):

$$V_i = 2,53 \cdot a_i^2 \cdot \left(3,8 \cdot a_i + 2 \cdot \delta_{\Sigma} \cdot n_z \cdot \frac{b_x}{(D_z \pm D_r) \cdot n_{\nabla}} \right). \quad (50)$$

Глубина внедрения зерна в поверхность заготовки является случайной функцией от двух случайных величин – диаметра абразивного зерна и расстояния между соответствующими точками микронеровностей заготовки и инструмента:

$$\begin{aligned} a_i &= K_{HB} \cdot (d_z - z) \text{ при } (d_z - z) > 0 ; \\ a_i &= 0 \text{ при } (d_z - z) \leq 0 , \end{aligned} \quad (51)$$

где K_{HB} – коэффициент, определяющий, какая часть размера зерна внедряется в поверхность заготовки.

Найдем значение этого коэффициента. При вдавливании зерен в поверхность заготовки в месте их контакта возникает напряжение, равное [3]:

$$\sigma_k = c \cdot \sigma_s , \quad (52)$$

где σ_s – предел текучести наклепанного металла; c – коэффициент, зависящий от формы неровностей.

Для случая абразивной обработки, при которой неровности режущей части зерен являются пологими, в равенстве (52) можно приближенно считать [3]:

$$\sigma_k = HB , \quad (53)$$

где HB – твердость по Бринеллю (при больших значениях твердости ее можно заменить твердостью по Виккерсу).

На основе (51) силу вдавливания абразивных зерен в поверхности заготовки и инструмента определяем из следующих выражений:

$$\begin{aligned} P_z &= S_z \cdot HB_z ; \\ P_r &= S_r \cdot HB_r , \end{aligned} \quad (54)$$

где S_z и S_r – площадь контакта зерен соответственно с поверхностями заготовки и инструмента; HB_r и HB_z – твердость инструментального ролика и заготовки соответственно.

Площади контакта зерен с поверхностями заготовки и инструмента найдем, используя равенство (44):

$$\begin{aligned} S_z &= 2,53 \cdot a_z^2 ; \\ S_r &= 2,53 \cdot a_r^2 . \end{aligned} \quad (55)$$

Подставляя выражения (55) в (54) и приравнивая правые части этих равенств, получим:

$$a_z = a_r \cdot \sqrt{\frac{HB_r}{HB_z}} . \quad (56)$$

На основании полученного выражения (56) можно определить:

$$K_{HB} = \frac{\sqrt{HB_r}}{\sqrt{HB_r} + \sqrt{HB_z}} . \quad (57)$$

При $z > d_z$ абразивное зерно не касается поверхности заготовки и не оставляет на нем отпечатка. При $0 < z < d_z$ абразивное зерно частично вдавливается в поверхность заготовки и инструмента. При $z = 0$ зерно полностью погружается в поверхность заготовки и инструмента.

Однако, на самом деле под действием усилий вдавливания в поверхность заготовки и инструмента зерно может разрушаться. В работе [1] показано, что при значительной сжимающей силе зерно раскалывается пополам. Разрушение происходит от растягивающих напряжений, возникающих в зерне в направлениях, перпендикулярных направлению сжимаю-

щей силы. На основе этих исследований можно определить значение критической силы сжатия, при которой происходит разрушение зерна:

$$P_{i\sigma} = N_{\sigma} \cdot |\sigma_p| \cdot d_z^2, \quad (58)$$

где $[\sigma_p]$ – предел прочности материала зерна на растяжение; N_{σ} – коэффициент, зависящий от материала абразивных зерен и дефектов их поверхности.

Приравнивая между собой правые части выражений (54) и (58) с учетом выражений (55), найдем критическую глубину внедрения зерна в поверхность заготовки и инструмента, при которой происходит его разрушение:

$$a_{z\sigma} = 0,63 \sqrt{\frac{N_{\sigma} \cdot |\sigma_p|}{HB_z}} d_z; \quad (59)$$

$$a_{r\sigma} = 0,63 \sqrt{\frac{N_{\sigma} \cdot |\sigma_p|}{HB_r}} d_z.$$

Суммируя правые части равенств (59), получим:

$$a_{\sigma} = 0,63 \sqrt{\frac{N_{\sigma} \cdot |\sigma_p|}{HB_z \cdot HB_r}} \cdot (HB_z + HB_r) \cdot d_z. \quad (60)$$

С учетом возможности разрушения зерен при глубине взаимодействия с заготовкой и инструментом, определяемой равенством (60), выражение (51) примет вид:

$$a_i = K_{HB} \cdot (d_z - z) \text{ при } K_{\sigma} \cdot d_z \geq (d_z - z) > 0; \\ a_i = 0 \text{ при } (d_z - z) \leq 0, \quad (61)$$

где

$$K_{\sigma} = 0,63 \sqrt{\frac{N_{\sigma} \cdot |\sigma_p|}{HB_z \cdot HB_r}} \cdot (HB_z + HB_r). \quad (62)$$

В соответствии с теоремой о законе распределения функций случайных величин имеем:

$$f(a_i) = K_{HB} \cdot \int_0^{\infty} f(d_z) \cdot f_z(d_z - a_i) dd_z, \quad (63)$$

где $f_z(d_z - a_i)$ – плотность вероятностей (15) распределения расстояний между смежными точками микрорельефа поверхностей заготовки и инструмента $z = d_z - a_i$.

Раскрывая в равенстве (63) значения плотностей вероятностей $f_z(d_z)$ (17) и $f(z)$ (15), с учетом ограничений (61), найдем:

$$f(a_i) = \frac{A_z \cdot A_a \cdot K_{HB}}{2\pi \cdot \sigma_z \cdot \sigma_d} \cdot \int_0^{\infty} e^{-\frac{(d_z - d_0)^2}{2\sigma_d^2}} \cdot e^{-\frac{(d_z - a_i)^2}{2\sigma_z^2}} \cdot dd_z. \quad (64)$$

где

$$A_a = \frac{1}{0,5 + F(a_{\max} / \sigma_a)}, \\ F(a_{\max}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_a} \cdot \int_0^{K_{\sigma} \cdot d_z / \sigma_a} e^{-\frac{(a - a_0)^2}{2\sigma_a^2}} \cdot dz,$$

где σ_a и a_s – среднее квадратическое отклонение и средняя глубина внедрения абразивных зерен в поверхность заготовки.

При нормально протекающем процессе доводки величина A_a должна быть близка к единице. В противном случае на поверхности заготовки будут оставаться глубокие углубления от разрушенных зерен. Поэтому принимая в равенстве (64) $A_a=1$, можно найти среднее значение глубины царапины:

$$a_{io} = \int_0^{\infty} a_i \cdot f(a_i) \cdot da_i = \frac{A_z \cdot K_{HB}}{2\pi \cdot \sigma_z \cdot \sigma_d} \cdot \int_0^{\infty} a_i \cdot da_i \int_0^{\infty} e^{-\frac{(d_z-d_o)^2}{2\sigma_d^2}} \cdot e^{-\frac{(d_z-a_i)^2}{2\sigma_z^2}} \cdot dd_z. \quad (65)$$

Методика определения съема припуска при использовании имитационной технологии абразивной обкаткой заключается в следующем. По формуле (7) определяется число абразивных зерен на единице поверхности инструмента, по формулам (27)-(33) – параметры площадки контакта заготовки и инструмента. Затем находится величина деформации микронеровностей (38) и при использовании этого значения из равенства (39) определяется вероятность контакта зерен с поверхностью заготовки. Далее по формуле (41) находится значение относительной частоты вращения центра инструментальных роликов и заготовки. Равенство (65) позволяет найти среднее значение глубины царапин от зерен на поверхности заготовки, а равенство (50) – среднее значение объема срезов от зерен. Подставляя найденные величины в равенство (5), определяем значение съема припуска.

Выполненные исследования выявляют механизм процесса абразивной обработки обкаткой и позволяют совершенствовать условия его осуществления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Королев А.В., Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Ч.1. Состояние рабочей поверхности инструмента. Саратов: СГУ, 1987. 180 с.
2. Рудзит Я.А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. Рига: Зинатне, 1975. 210 с.
3. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
4. Буше Н.А. Трение, износ и усталость в машинах. М.: Транспорт, 1987. 325 с.
5. Спришевский А.И. Подшипники качения. М.: Машиностроение, 1969. 632 с.
6. Королев А.В. Выбор оптимальной геометрической формы контактирующих поверхностей деталей машин и приборов. Саратов: СГУ, 1972. 162 с.
7. Королев А.А. Математическое моделирование упругих тел сложной формы. Саратов: СГТУ, 2001. 128 с.

Королев Альберт Викторович –

доктор технических наук,
профессор кафедры «Технология машиностроения»
Саратовского государственного технического университета

Королев Андрей Альбертович –

доктор технических наук,
профессор кафедры «Технология машиностроения»
Саратовского государственного технического университета

Решетников Михаил Константинович –

кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»
Саратовского государственного технического университета