

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проников А. С. Программный метод испытания металлорежущих станков. — М.: Машиностроение, 1985. — 288 с.
2. Пуш А. В. Моделирование и мониторинг станков и станочных систем // СТИН. — 2000. — №9 — С. 12—19.
3. Васильев Г. Н., Ягопольский А. Г., Трёмасов А. П. Проблемы диагностики и обеспечения надежности металлорежущих станков // СТИН. — 2003 — №7. — С. 14—17.

621.923

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ ПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Д-р техн. наук, проф. Л. В. ХУДОБИН, канд. техн. наук, доц. А. Н. УНЯНИН

Аналитически получены и экспериментально подтверждены зависимости для расчета сил шлифования, учитывающие изменение глубины внедрения зерна в материал заготовки по длине дуги контакта круга с заготовкой и зависимость глубины внедрения от величины навалов по краям шлифовочных царапин. В результате численного расчета установлено влияние различных факторов, в том числе коэффициента навалов, коэффициента трения зерна о заготовку, износа абразивного зерна, зернистости шлифовального круга на силы шлифования и их составляющие.

Design value of grinding pressure, taking into account projected range of grain in a material of preparation on length of an arch of contact in a billet circle and projected range of a heading on bulk magnitude with the edges of scratch scores are analytically gained and experimentally confirmed. As a result of numerical calculation it was determined that there's an involvement of various factors i.e. bulk ratio, constant of friction of grain about billet, wear of a grinding circle and its graininess on grinding pressure and the rectangular components. Как известно, при шлифовании заготовок из пластичных материалов доминирующим фактором, приводящим к снижению режущей способности шлифовальных кругов (ШК), является засаливание их рабочих поверхностей. Процесс засаливания сопровождается увеличением коэффициента трения в контакте шлифовального круга с заготовкой, что неизбежно приводит к усилению силовой и тепловой напряженности процесса шлифования.

С целью прогнозирования технологических возможностей различных энергетических воздействий на рабочую поверхность круга, необходимых для стабилизации его режущей способности, выполнено моделирование сил шлифования, функционально связанных с режущей способностью абразивного круга.

Одной из причин увеличения силы шлифования при обработке заготовок из пластичных материалов является интенсивное оттеснение материала заготовки с образованием навалов по сторонам шлифовочной царапины [1]. Образовавшиеся навалы удаляются смежными абразивными зернами (АЗ), в результате чего увеличиваются фактические глубины внедрения их в материал заготовки и силы шлифования. Однако известные аналитические зависимости для расчета сил шлифования не содержат в качестве аргументов параметры, характеризующие размеры навалов, что может привести к неадекватным результатам при расчете сил, действующих при обработке заготовок из пластичных материалов.

В развитие известных аналитических исследований сил шлифования [1—3] приняли во внимание, что максимальная глубина внедрения АЗ в материал заготовки a_m изменяется по длине l дуги контакта круга с заготовкой и зависит от величины навалов по

краям шлифовочных царапин. Аналогично исследованиям [2], составляющие силы шлифования представим в следующем виде:

$$P_y = P_{yp1} + P_{yp2} + P_{yд1} + P_{yд2};$$

$$P_z = P_{zp1} + P_{zp2} + P_{zd1} + P_{zd2},$$

где P_{yp1} и P_{zp1} , P_{yp2} и P_{zp2} — радиальные (индекс y) и касательные (z) составляющие силы шлифования, обусловленные соответственно диспергированием материала заготовки и трением режущих АЗ о заготовку; $P_{yд1}$ и P_{zd1} , $P_{yд2}$ и P_{zd2} — составляющие силы шлифования, обусловленные соответственно пластическим деформированием материала заготовки и трением давящих АЗ о заготовку.

Допуская, что при небольших глубинах внедрения зерен круга в материал заготовки число зерен, контактирующих с заготовкой, увеличивается линейно с увеличением глубины их залегания (рис. 1), зависимость для расчета числа зерен, находящихся в контактом взаимодействии с заготовкой на глубине y , можно представить в следующем виде:

$$n_p = n_{зк} c_k y,$$

где $n_{зк}$ — число зерен на поверхности круга, ограниченной размерами контактной зоны; c_k — коэффициент [4].

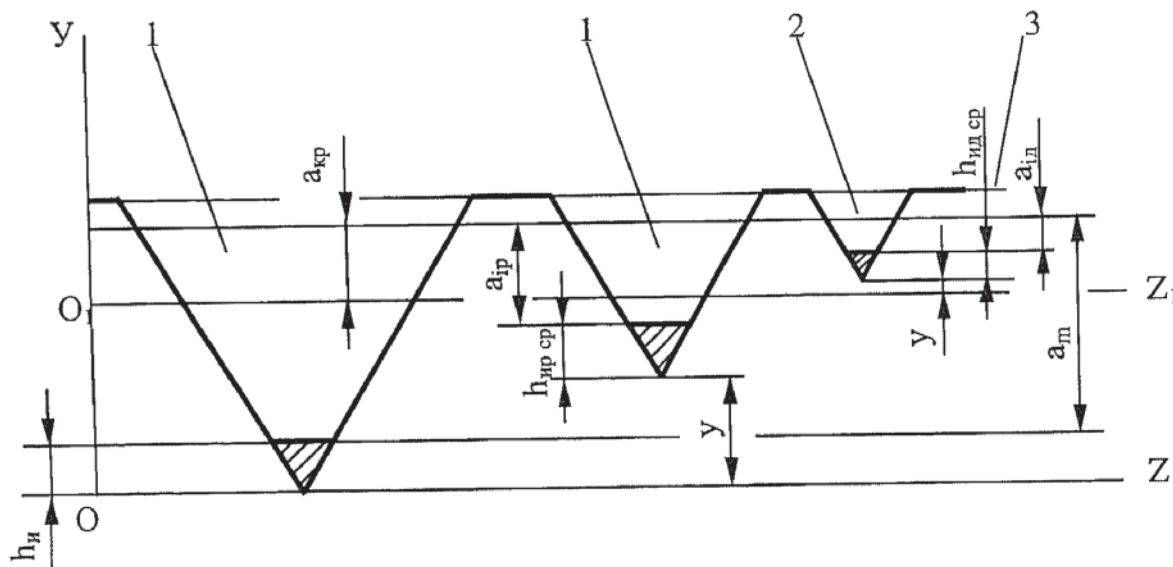


Рис. 1. Схема расположения абразивных зерен круга: 1 — режущие зерна; 2 — пластически деформирующее зерно; 3 — условная поверхность связки круга

С учетом увеличения глубины внедрения $a_{зм}$ зерна в материал заготовки за счет навалов и зависимости ее от длины дуги контакта ϵ , режущими будут зерна, расположенные на расстоянии y от условной наружной поверхности круга

$$0 \leq y \leq h_{и} + a_{зм}(l)(1 + \epsilon_{и}),$$

где $a_{зм}(l)$ — функция, описывающая изменение максимальной подачи на одно зерно по длине контакта, м; $h_{и}$ — суммарная величина скалывания зерен при правке и размерного износа ШК; $\epsilon_{и}$ — коэффициент навалов.

Учесть зависимость a_m от l можно, если при суммировании составляющих силы микрорезания единичными зернами использовать кратное интегрирование. В частности

$$P_{yрi} = \int_0^{l_k} \left[\int_0^{h_u + a_m(l)(1+\epsilon_u)} P_{yрi} n_{зкл} c_k dy \right] dl ; \quad (1)$$

$$P_{yрi} = \tau_s a_{ip} \sqrt{2\rho_{30}(a_{ip} + h_{ipcp})} K_y , \quad (2)$$

где $P_{yрi}$ — сила микрорезания i -ым единичным зерном, Н; l_k — длина дуги контакта зерна с заготовкой, м; $n_{зкл}$ — число зерен на поверхности круга в сечении его плоскостью, параллельной оси круга, 1/м; ($n_{зкл} = Z_0 H$, где Z_0 — число зерен на единичной площадке, находящейся на рабочей поверхности круга, 1/м²; H — высота круга, м); a_{ip} — глубина внедрения в заготовку i -го режущего зерна, м; ρ_{30} — начальный радиус окружности, описанной около граней вершины режущей кромки зерна, м; h_{ipcp} — средний износ зерен, осуществляющих микрорезание, м; K_y — коэффициент [2].

Для плоского шлифования, широко используемого в промышленности (рис. 2), максимальная глубина внедрения зерна в заготовку

$$a_{эмmax} = BC = S_{прз} \sin \alpha_{max} ; \quad (3)$$

$$S_{прз} = \frac{V_{спр} l_m}{\pi D_k n_k} , \quad (4)$$

где $S_{прз}$ — продольная подача на одно зерно круга, м; l_m — среднее расстояние между режущими зернами, м; $v_{спр}$ — скорость продольной подачи, м/мин; D_k — диаметр шлифовального круга, м; n_k — частота вращения круга, 1/мин.

$$\alpha_{max} = \arccos \frac{D_k - 2t}{D_k} ,$$

где t — глубина шлифования, м.

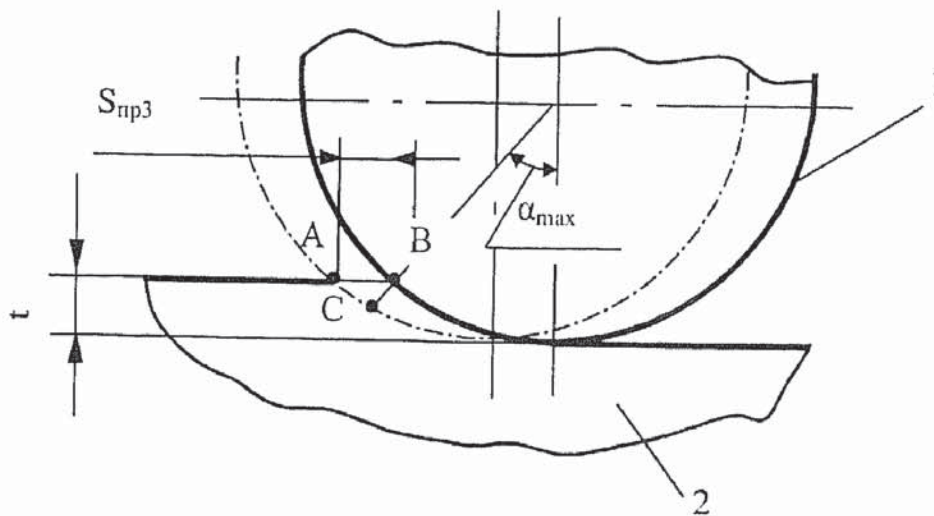


Рис. 2. Схема к расчету глубины внедрения АЗ в заготовку: 1 — ШК; 2 — заготовка

Чтобы рассчитать среднее расстояние между режущими зернами l_m , необходимо знать глубину внедрения зерна в заготовку, которая также неизвестна и зависит, в свою

очередь, от l_m . Чтобы найти $a_{3m\max}$ и l_m , использовали метод последовательных приближений.

Для расчета $a_{3m}(l)$ предложена зависимость

$$a_{3m}(l) = a_{3m\max} \frac{l}{l_k}, \quad (5)$$

где l — расстояние, пройденное зерном вдоль дуги контакта с заготовкой,

или

$$a_{3m}(l) = \frac{V_{\text{сп}} \sin \alpha_{\max} l_m l}{\pi D_k n_k l_k}. \quad (6)$$

Для расчета глубины внедрения в заготовку i -го режущего зерна используем зависимость

$$a_{ip} = a_m(l) - h_{\text{ирср}} - y + h_n, \quad (7)$$

где $a_m(l)$ — функция, описывающая изменение максимальной глубины внедрения зерна в материал заготовки по длине контакта.

Поскольку $a_m(l) = a_{3m}(l) + a_{\text{кр}}$, то

$$a_{ip} = a_{3m}(l) - y - h_{\text{ирср}} + a_{\text{кр}} + h_n,$$

где $a_{\text{кр}}$ — критическая глубина внедрения зерна в заготовку.

При обработке заготовок из пластичных материалов образующиеся по краям шлифовочных царапин навалы удаляются смежными зернами. Тогда глубину внедрения зерна в заготовку можно рассчитать по зависимости

$$a_{ip1} = a_{ip}(1 + \varepsilon_n). \quad (8)$$

Выражение для расчета силы микрорезания i -м единичным зерном P_{yp1} примет следующий вид:

$$P_{yp1} = \int_0^{l_k} \left[\int_0^{h_n + a_{3m}(l)(1 + \varepsilon_n)} K_y \tau_s (a_{3m}(l)(1 + \varepsilon_n) - y - h_{\text{ирср}} + a_{\text{кр}} + h_n) \times \right. \\ \left. \times \sqrt{2\rho_{30} (a_{3m}(l)(1 + \varepsilon_n) + a_{\text{кр}} - y + h_n) n_{3k1} c_k} dy \right] dl. \quad (9)$$

Введя обозначения

$$A = \frac{V_{\text{сп}} \sin \alpha_{\max} l_m}{\pi D_k n_k l_k};$$

$$B_p = \tau_s n_{3k1} c_k \sqrt{2\rho_{30}},$$

получим зависимость для расчета $P_{ур1}$ в более удобном виде

$$P_{ур1} = \frac{0,144K_y B_p}{A(1+\epsilon_n)} \left((Al_k(1+\epsilon_n) + a_{кр} + h_n)^{3,5} - (a_{кр} + h_n)^{3,5} - \right. \\ \left. - 2,33h_{нрср} \left((Al_k(1+\epsilon_n) + a_{кр} + h_n)^{2,5} - (a_{кр} + h_n)^{2,5} \right) \right) - \\ - 0,133K_y B_p l_k \left(3a_{кр}^{2,5} - 5h_{нрср} a_{кр}^{1,5} \right). \quad (10)$$

Для расчета $P_{ур2}$ получена зависимость

$$P_{ур2} = D\tau_s (h_n l_k + 0,5Al_k^2(1+\epsilon_n)), \quad (11)$$

где

$$D = \frac{\pi\rho_{30}h_{нрср}n_{3к}c_k}{3\mu_s},$$

где τ_s — коэффициент внутреннего трения в плоскости сдвига.

Для расчета глубины внедрения в заготовку i -го пластически деформирующего зерна использовали выражение

$$a_{ид} = a_{кр} - y - h_{идср},$$

$h_{идср}$ — средний износ зерен, осуществляющих пластическую деформацию.

Обозначим

$$B_d = 0,707c\sigma_m n_{3к} c_k \sqrt{\rho_{30}}.$$

Тогда

$$P_{уд1} = 2B_d (\sin\gamma + \mu_0 \cos\gamma) \left[0,25\sqrt{h_{идср}} (a_{кр}^2 + 2a_{кр}h_{идср}) + \right. \\ \left. + 0,2 \left((a_{кр} + h_{идср})^{2,5} - h_{идср}^{2,5} \right) - 0,5h_{идср}^{1,5} a_{кр} - \right. \\ \left. - 0,33h_{идср} \left((a_{кр} + h_{идср})^{1,5} - h_{идср}^{1,5} \right) \right], \quad (12)$$

где γ — угол при вершине зерна, град.; μ_0 — коэффициент трения зерна о заготовку?

$$P_{уд2} = C_d a_{кр}; \quad (13) \\ C_d = \frac{\pi\rho_{30}h_{идср}H_m}{3} n_{3к} c_k,$$

где H_M — твердость материала заготовки.

Подобным образом получены зависимости для расчета составляющих силы P_z . Коэффициент трения засаленного зерна о заготовку определяли по формуле

$$\mu_0 = \mu_{зм} (1 - K_3) + \mu_{нм} K_3,$$

где $\mu_{зм}$ и $\mu_{нм}$ — коэффициенты трения АЗ и налива о заготовку соответственно; K_3 — коэффициент, равный отношению площади наливов на поверхности контакта АЗ с заготовкой к площади этой поверхности.

Напряжение сдвига определяли по зависимости

$$\tau_s = \sigma_{iш} / 1,5,$$

где $\sigma_{iш}$ — интенсивность напряжений при шлифовании [3].

Коэффициенты K_3 и ϵ_n , а также критическую глубину внедрения АЗ в материал заготовки, являющиеся аргументами зависимостей для расчета сил шлифования, определили в ходе экспериментального исследования микрорезания заготовок [6].

В качестве примера практического применения полученных зависимостей приведем расчет, выполненный с использованием разработанного программного обеспечения, сил шлифования и их составляющих, действующих при обработке заготовок из стали 40Х, НВ 190...217 кругами диаметром 200 мм из электрокорунда белого 16-ой и 40-ой зернистостей. Режим шлифования: $V_k = 35$ м/с, $V_{snp} = 10$ м/мин = 0,17 м/с.

На рис. 3 приведены результаты расчета сил P_y и P_z и их составляющих при шлифовании кругом 40-ой зернистости ($h_n = 5$ мкм, $\Sigma_n = 0,3$, $z_0 = 5,4$ 1/мм², $\rho_{30} = 0,03$ мм) [1—5] и экспериментальные данные, полученные при обработке заготовок из стали 40Х кругом 1—200×20×32 24А40ПСТ16К5 непосредственно после его правки.

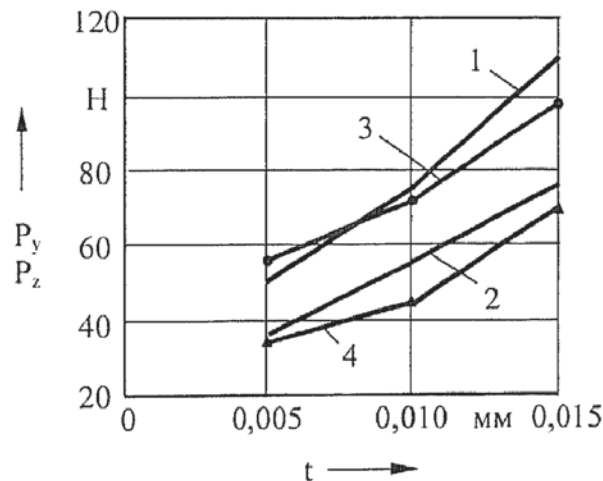


Рис. 3. Зависимость сил шлифования P_y и P_z от глубины шлифования t : 1, 3 — P_y ; 2, 4 — P_z ; 1, 2 — расчет; 3, 4 — эксперимент; $V_k = 35$ м/с; $V_{snp} = 10$ м/мин; шлифовальный круг 24А40ПСТ16К5

Силы пластического деформирования $P_{уд1}$, $P_{уд2}$, $P_{зл1}$ и $P_{зл2}$ незначительны в сравнении с силами P_y и P_z : сумма сил, связанных с пластическим деформированием и трением АЗ о заготовку, не превышает 6 % от сил P_y и P_z . С увеличением глубины шлифования в 3 раза P_y и P_z увеличились в 2,1 раза, причем в большей степени увеличились силы $P_{уп1}$ и $P_{сп1}$, связанные с диспергированием материала заготовки режу-

щими зернами, — в 2,23 и 2,15 раза соответственно, остальные силы выросли менее чем в 2 раза.

Данные, приведенные на рис. 3, свидетельствуют об удовлетворительной сходимости расчетных и экспериментальных значений сил P_y и P_z , так как их максимальное расхождение не превышает 26 %.

Изменение коэффициента навалов ϵ_n от 0 до 0,5, при прочих равных условиях, привело к увеличению сил P_y и P_z на 57 и 63 % соответственно, т.е. роль параметра ϵ_n , значение которого для пластичных материалов достигает 0,7 — 0,8 [2], существенна (рис.4, 5). При этом силы P_y и P_z увеличились, главным образом, за счет роста составляющих сил P_{yp1} и P_{zp1} на 78 и 72 % соответственно вследствие увеличения количества режущих зерен на рабочей поверхности круга и глубины их внедрения в заготовку.

Составляющие силы P_{yp2} и P_{zp2} увеличились лишь на 27 % за счет увеличения числа режущих зерен; радиальные силы от пластически деформирующих зерен при изменении ϵ_n остались на прежнем уровне.

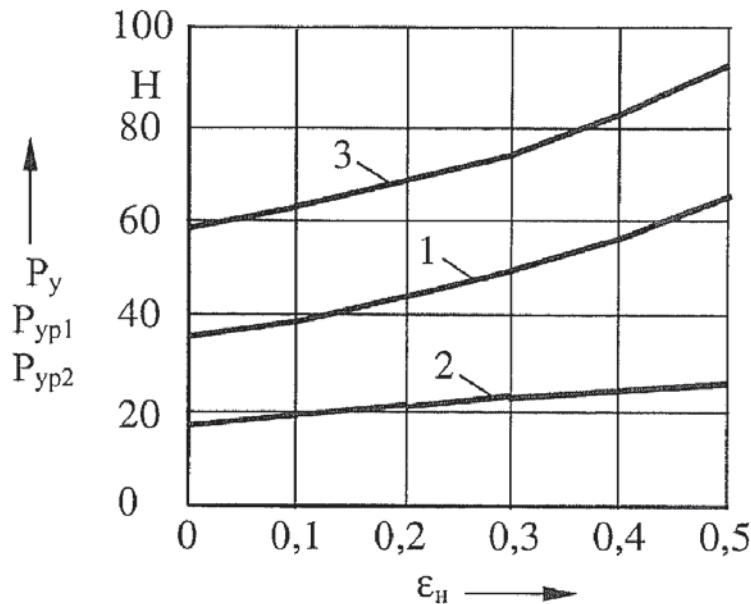


Рис. 4. Зависимость радиальной силы шлифования P_y и ее составляющих P_{yp1} , P_{yp2} от коэффициента навалов ϵ_n при шлифовании кругом 40-ой зернистости (расчетные данные): 1, 2, 3 — P_{yp1} , P_{yp2} и P_y соответственно; $\mu_0 = 0,3$; $h_n = 5$ мкм

Коэффициент трения μ_0 влияет на силу P_y лишь за счет ее составляющей $P_{уд1}$. Изменение μ_0 от 0,2 до 0,5 привело к незначительному увеличению этой силы и, кроме того, абсолютное значение $P_{уд1}$ в сравнении с P_y весьма мало.

На касательную силу шлифования P_z коэффициент μ_0 влияет посредством изменения ее составляющих P_{zp2} , P_{zd1} и P_{zd2} , на P_{zp1} коэффициент трения μ_0 не влияет. Составляющие силы P_{zp2} и P_{zd2} увеличиваются, согласно результатам расчета, пропорционально коэффициенту μ_0 ; при этом сила P_{zd1} выросла незначительно. В результате при увеличении μ_0 с 0,2 до 0,5 сила шлифования P_z увеличилась при $t = 0,005$; 0,010 и 0,015 мм на 16,5; 15,5 и 14,0 % соответственно, т.е. темп роста P_z с увеличением глубины резания замедляется (рис. 6).

Таким образом, увеличение коэффициента трения μ_0 АЗ о заготовку приводит, главным образом, к заметному росту касательной силы P_z и к незначительному увеличению радиальной силы P_y .

При увеличении износа АЗ h_n от 5 до 10 мкм [1, 2] в большей степени увеличилась радиальная сила P_y (в 2 раза); касательная сила P_z выросла на 73 %. Силы P_{yp1} и P_{zp1}

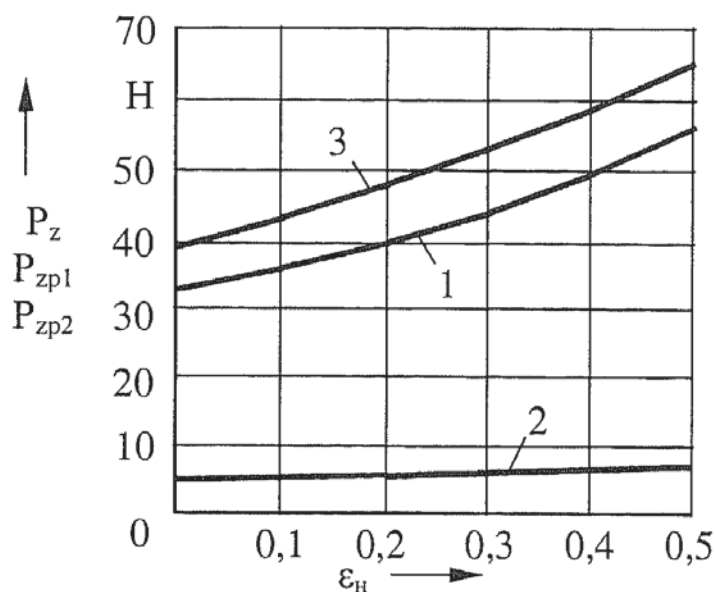


Рис. 5. Зависимость касательной силы шлифования P_z и ее составляющих P_{zp1} , P_{zp2} от коэффициента навалов ϵ_n при шлифовании кругом 40-ой зернистости (расчетные данные): 1, 2, 3 — P_{zp1} , P_{zp2} и P_z соответственно; $\mu_0 = 0,3$; $h_n = 5$ мкм

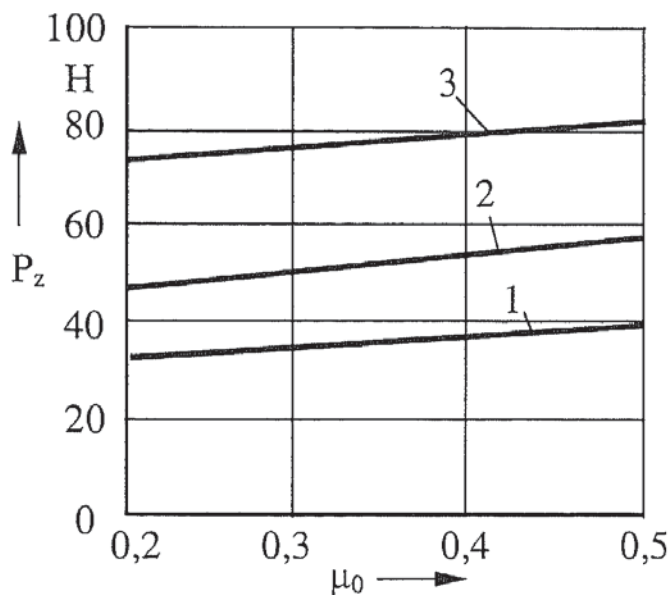


Рис. 6. Зависимость касательной силы шлифования P_z от коэффициента трения μ_0 и глубины шлифования t (расчетные данные): 1, 2, 3 — $t = 0,005$; $0,010$ и $0,015$ мм соответственно; $\epsilon_n = 0,3$; $h_n = 5$ мкм

диспергирования материала заготовки режущими АЗ выросли на 58 %, а силы P_{yp2} и P_{zp2} , связанные с трением диспергирующих (режущих) АЗ о заготовку, увеличились почти в 3 раза; в 2 раза выросли силы $P_{уд2}$ и $P_{зд2}$, что обусловлено трением о заготовку пластически деформирующих АЗ.

В процессе шлифования рабочая поверхность круга изнашивается, затупляется и засаливается. Износ связан с увеличением площадок затупления на зернах круга, в результате засаливания увеличивается коэффициент трения зерен о заготовку. При моделировании изменения сил P_y и P_z по мере увеличения наработки круга полагали, что непосредственно после правки круга $\mu_0 = 0,3$, $h_n = 5$ мкм; в конце периода стойкости круга $\mu_0 = 0,5$, $h_n = 10$ мкм [1—6]. Одновременное изменение параметров μ_0 и h_n приво-

дит, по расчетным данным, к увеличению сил P_y и P_z к концу периода стойкости круга на 60 и 55 % соответственно; экспериментальные данные свидетельствуют, что P_y и P_z выросли соответственно на 40 и 55 %. Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 28 %.

На рис. 7 и 8 приведены результаты расчета сил шлифования P_y и P_z и их составляющих для круга 16-ой зернистости ($z_0 = 23,4$ 1/мм², $\lambda_{30} = 14,5$ мкм [2]) при следующих условиях: $t = 0,01$ мм; $\mu_0 = 0,3$; $h_n = 5$ мкм. В этом случае сумма сил, связанных с пластическим деформированием материала заготовки и трением давящих АЗ о заготовку, составляет от 36 до 60 % значений сил P_y и P_z , т.е. с уменьшением зернистости ШК доля энергии, затрачиваемой на пластическое деформирование материала заготовки, увеличивается. В отличие от круга 40-ой зернистости составляющая сила P_{yp2} , обусловленная трением о заготовку режущих АЗ, в несколько раз превышает силу P_{yp1} , обусловленную диспергированием материала заготовки этими зернами. Изменение коэффициента навалов ϵ_n от 0 до 0,5 при прочих равных условиях привело к увеличению сил P_y и P_z на 30 и 46 % соответственно, т.е. в меньшей степени, чем при шлифовании кругом 40-ой зернистости. В большей степени (в 4 раза) увеличились силы P_{yp1} и P_{zp1} ; P_{yp2} и P_{zp2} увеличились незначительно, а силы пластического деформирования АЗ материала заготовки не изменились. Из рис. 9 следует, что расхождение расчетных и экспериментальных значений сил шлифования не превышает 10 %.

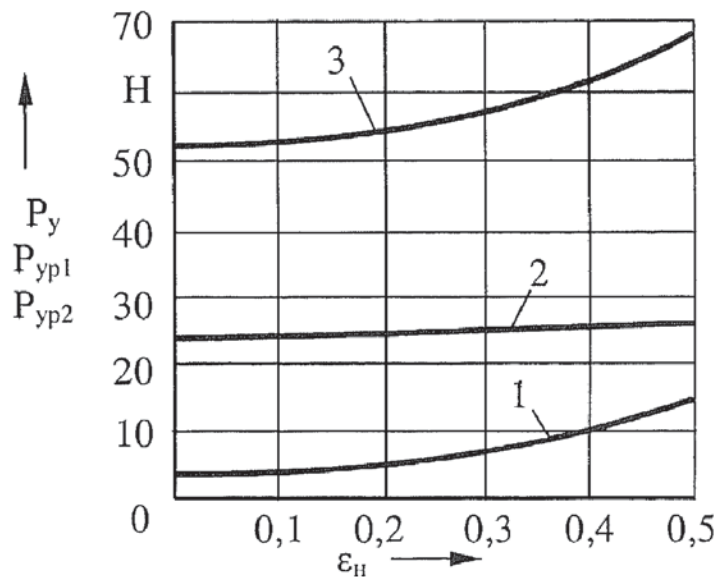


Рис. 7. Зависимость радиальной силы шлифования P_y и ее составляющих P_{yp1} , P_{yp2} от коэффициента навалов ϵ_n для круга 16-ой зернистости (расчетные данные): 1, 2, 3 — P_{yp1} , P_{yp2} и P_y соответственно; $\mu_0 = 0,3$; $h_n = 5$ мкм

Таким образом, изменение коэффициента навалов ϵ_n от 0 до 0,5 при прочих равных условиях привело к увеличению сил P_y и P_z на 54 и 64 % соответственно при обработке ШК 40-ой зернистости и на 30—46 % — кругом 16-ой зернистости.

В результате аналитического исследования и численного моделирования силовой напряженности шлифования получены следующие результаты.

Показана возможность использования полученных зависимостей, учитывающих образование навалов по краям шлифовочных царапин, для расчета сил, действующих при шлифовании заготовок из пластичных материалов.

Установлено соотношение значений составляющих силы шлифования и выявлено, что с уменьшением зернистости ШК, при прочих равных условиях, увеличивается доля в

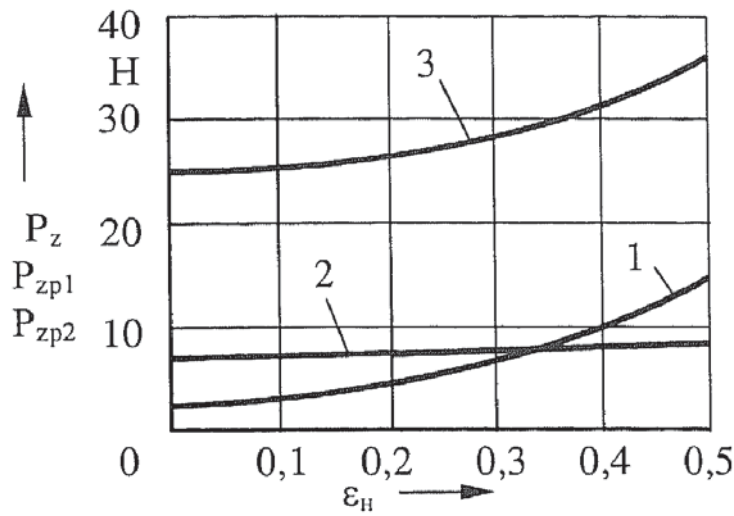


Рис. 8. Зависимость касательной силы шлифования P_z и ее составляющих P_{zp1} , P_{zp2} от коэффициента навалов ϵ_n для круга 16-ой зернистости (расчетные данные): 1, 2, 3 — P_{zp1} , P_{zp2} и P_z соответственно; $\mu_0 = 0,3$; $h_n = 5$ мкм

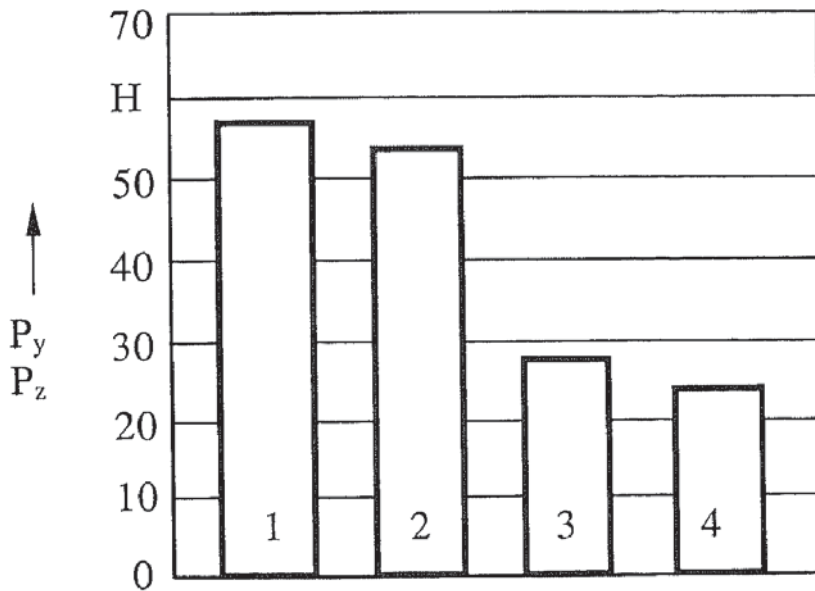


Рис. 9. Расчетные (1, 3) и экспериментальные (2, 4) значения сил шлифования: 1, 2 — P_y ; 3, 4 — P_z ; $V_k = 35$ м/с; $V_{снр} = 10$ м/мин; круг 25А16ПСТ26К2; $t = 0,01$ мм; $\epsilon_n = 0,3$

суммарной силе шлифования составляющих сил, связанных с пластическим деформированием и трением зерен о заготовку.

Установлено, что увеличение коэффициента трения АЗ о заготовку приводит, прежде всего, к росту касательной силы, а при увеличении износа АЗ в большей степени увеличивается радиальная сила.

Для снижения мощности тепловыделения в зоне обработки, пропорциональной касательной составляющей силы шлифования, важно, в первую очередь, снижать и стабилизировать коэффициент трения зерна о заготовку, а также уменьшать износ зерен. Наибольший эффект от снижения и стабилизации коэффициента трения достигается при шлифовании мелкозернистыми кругами, когда удельный вес энергии, затрачиваемой на трение АЗ о заготовку, в энергоемкости процесса шлифования больше, чем при использовании крупнозернистых кругов.

Для уменьшения коэффициента трения при обработке заготовок из пластичных материалов следует использовать средства, способствующие снижению интенсивности засаливания рабочей поверхности ШК и удаления с нее отходов шлифования. Наиболее радикальные пути повышения режущей способности круга — применение эффективных способов подачи смазочно-охлаждающих жидкостей: струйно-напорного внезонного, гидроаэродинамического и ультразвукового, а также механическая очистка рабочей поверхности ШК абразивными брусками [7, 8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филимонов Л. Н. Высокоскоростное шлифование. — Л.: Машиностроение, 1979. — 248 с.
2. Ефимов В. В. Модель процесса шлифования с применением СОЖ. — Саратов: СГУ, 1992. — 132 с.
3. Корчак С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. — М.: Машиностроение, 1974. — 280 с.
4. Островский В. И. Теоретические основы процесса шлифования. — Л.: ЛГУ, 1981. — 144 с.
5. Унянин А. Н. Фрикционное взаимодействие единичного абразивного зерна с заготовкой // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы; сб. статей междунар. научно-техн. конф. — Волжский: ВИСИ, 2004. — С. 159—162.
6. Худобин Л. В., Унянин А. Н. Исследование процесса микрорезания заготовок из пластичных материалов единичным абразивным зерном // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы; сб. статей междунар. научно-техн. конф. — Волжский: ВИСИ, 2004. — С. 108—111.
7. Худобин Л. В., Белов М. А. Шлифование заготовок из коррозионностойких сталей с применением СОЖ. — Саратов: СГУ, 1989. — 148 с.
8. Унянин А. Н. Стабилизация режущей способности шлифовального круга при обработке заготовок из пластичных материалов // Динамика технологических систем: сб. трудов 7-ой междунар. научно-техн. конф. — Саратов: СГТУ, 2004. — С. 353—356.