

## РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ НАПЛАВЛЕННЫХ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНУСОВ И ЧАШ ЗАСЫПНЫХ АППАРАТОВ

**Новиков Ф.В., докт. техн. наук, Андилахай В.А.**  
(Харьковский национальный экономический университет,  
Приазовский государственный технический университет)

**Введение и постановка задачи.** Для загрузки шихты в доменную печь и равномерного ее распределения по окружности колошника, а также для предотвращения выхода колошникового газа в атмосферу при загрузке шихты в печь используется засыпное устройство. Основным его конструктивным элементом является засыпной аппарат (рис. 1) [1]. Шихта в засыпной аппарат подаётся скипами или транспортёрами. Из приёмной воронки (рис. 1) шихта поступает сначала на малый конус, а затем на большой конус. Большой конус опускается при закрытом малом конусе, что предотвращает прорыв газов из печи в атмосферу. Для равномерной загрузки шихты по окружности колошника применяют вращающиеся распределители шихты.

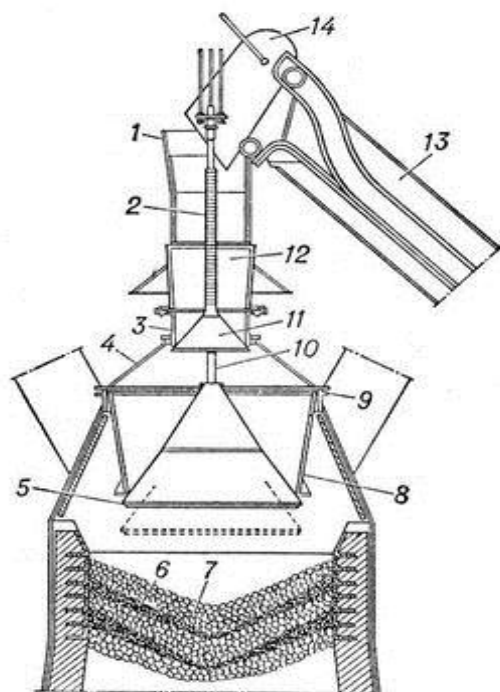


Рис. 1. Засыпной аппарат доменной печи:  
1 – направляющая воронка; 2 – пустотелая штанга малого конуса; 3 – распределитель шихты; 4 – газовый затвор; 5 – большой конус; 6 – руда; 7 – кокс; 8 – чаша большого конуса; 9 – основное кольцо (колошниковый фланец); 10 – штанга большого конуса; 11 – малый конус; 12 – приёмная воронка; 13 – наклонный мост; 14 – скип.

Шихта в печь используется засыпное устройство. Основным его конструктивным элементом является засыпной аппарат (рис. 1) [1]. Шихта в засыпной аппарат подаётся скипами или транспортёрами. Из приёмной воронки (рис. 1) шихта поступает сначала на малый конус, а затем на большой конус. Большой конус опускается при закрытом малом конусе, что предотвращает прорыв газов из печи в атмосферу. Для равномерной загрузки шихты по окружности колошника применяют вращающиеся распределители шихты.

Конус и чаша (рис. 2) предназначены для выполнения функции распределения и шлюзования шихтовых материалов, а также газоуплотнения колошника доменной печи. Они работают в очень тяжелых условиях и поэтому должны обладать высоким ресурсом работы, что достигается обеспечением повышенной износостойкости и точной геометрии контактных поверхностей (поясов). Для этого на контактную поверхность наплавляется

износостойкий материал, который затем подвергается шлифованию. Однако, как показывает практика, процесс круглого шлифования контактных поверхностей с износостойкими наплавленными материалами больших и малых конусов и чаш (соответственно диаметром 5000 мм и 2000 мм) засыпных аппаратов доменных печей характеризуются высокой трудоемкостью обеспечения требуемых параметров точности и качества обрабатываемых поверхностей. Основными причинами низкой эффективности обработки являются плохая обрабатываемость шлифованием износостойких наплавленных материалов, например, Пл-Нп 500Х40НС2РЦ-Б-С (ГОСТ 26467-85) твердостью HRC 58–59, значительная неравномерность снимаемого припуска (3–7 мм на сторону), большая площадь обрабатываемых поверхностей и низкая жесткость технологической системы (токарно-карусельного станка, на котором осуществляется процесс шлифования). Как установлено экспериментально, применение алмазного электроэрозионного шлифования также оказалось малоэффективным вследствие засаливания алмазного круга и потери его режущей способности [2,3]. Из этого сделан вывод о возможности повышения эффективности действующего технологического процесса шлифования путем снижения силовой и тепловой напряженности процесса шлифования за счет выбора и обоснования новых прогрессивных схем шлифования и оптимальных режимов резания. При этом важно обеспечить устранение неравномерности снимаемого припуска на операции предварительного шлифования, что позволит сократить продолжительность операции окончательного шлифования.



Рис. 2. Общий вид конуса и чаши засыпного аппарата.

**Цель работы** – повышение точности и производительности обработки при круглом шлифовании контактных поверхностей с износостойкими наплавленными материалами конусов и чаш засыпных аппаратов доменных печей на основе научно обоснованного выбора оптимальной схемы и параметров режимов шлифования.

**Результаты исследований.** Первоначально определены условия устранения неравномерности снимаемого припуска на операции предварительного шлифования при относительно низкой жесткости технологической системы. Используя теоретический подход к установлению погрешностей обработки (обусловленных возникающими в технологической системе упругими перемещениями) [4], аналитически определена погрешность формы обрабатываемой поверхности при круглом шлифовании по жесткой схеме (рис. 3):

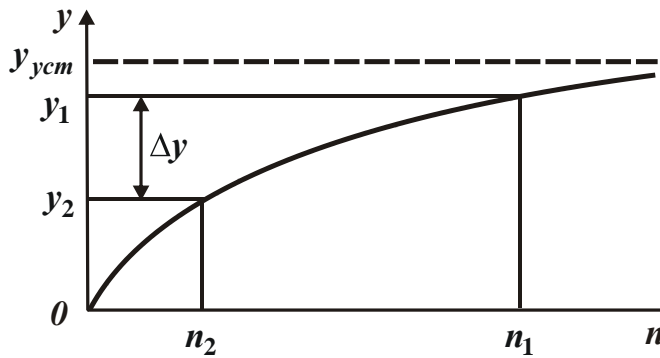


Рис. 3. Зависимость величины  $y$  от количества проходов  $n$ .

$$\Delta y = y_1 - y_2 = y_{уст} \cdot (\varepsilon^{-n_2} - \varepsilon^{-n_1}) \quad (1)$$

где  $y_1, y_2$  – упругие перемещения, образующиеся при обработке участков поверхности с наибольшим и наименьшим снимаемыми припусками, м;  $n_1, n_2$  – количество проходов круга;  $y_{уст} = B_1 \cdot t$  – упругое перемещение при

установившемся процессе шлифования, м;  $B_1 = \frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot S_{прод} \cdot \sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$

безразмерный параметр;  $\varepsilon = 1 + \frac{1}{B_1}$  – уточнение на проходе круга;  $t$  – глубина шлифования, м;  $S_{прод}$  – скорость продольной подачи, м/с;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с;  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup> (энергоемкость обработки, Дж/м<sup>3</sup>);  $K_{ш} = P_z / P_y$  – коэффициент шлифования;  $P_z, P_y$  – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н;  $c$  – жесткость технологической системы, Н/м;  $D_{дет}$  – диаметр детали, м.

Согласно зависимости (1), уменьшить  $\Delta y \rightarrow 0$  можно уменьшением величины  $y_{уст}$  и увеличением  $\varepsilon, n_1$  и  $n_2$ . Уменьшение  $y_{уст} = B_1 \cdot t$  и

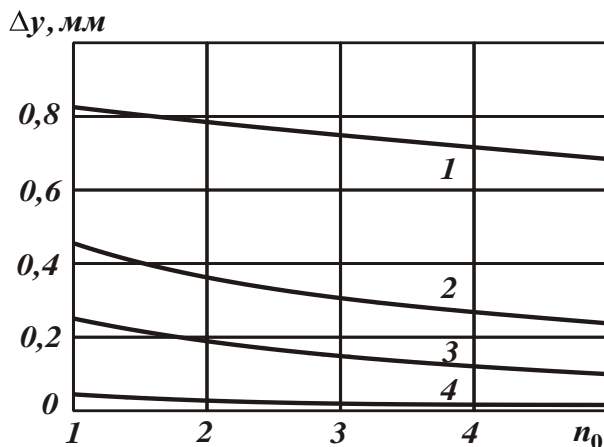


Рис. 4. Зависимость  $\Delta y$  от  $n_0$ : 1 –  $\varepsilon = 1,1$ ; 2 –  $\varepsilon = 1,5$ ; 3 –  $\varepsilon = 2$ ; 4 –  $\varepsilon = 5$ .

увеличение  $\varepsilon$  связано с уменьшением  $B_1$  путем уменьшения параметров  $\sigma, S_{прод}, D_{дет}$  и увеличения  $c, K_{ш}$  и  $V_{кр}$ . Увеличение количества проходов круга  $n_1$  и  $n_2$  предполагает обеспечение установившегося во времени процесса шлифования, при котором  $y_1 \rightarrow y_{уст}$  и  $y_2 \rightarrow y_{уст}$  (рис. 3). Однако, это возможно при

относительно больших значениях уточнения  $\varepsilon > 1$ . В противном случае будет происходить копирование обрабатываемой поверхности по проходам круга, что имеет место в действующем процессе круглого шлифования. Поэтому необходимо увеличивать  $\varepsilon$  за счет уменьшения  $B_1$ .

На рис. 4 приведены рассчитанные по преобразованной зависимости (1)

$$\Delta y = \frac{\Delta \Pi}{(\varepsilon - 1)} \cdot \varepsilon^{-n_2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon^{-n_0})}{n_0} \quad (2)$$

значения  $\Delta y$  (где  $n_0 = n_1 - n_2 = \Delta \Pi / t$ ;  $\Delta \Pi = \Pi_1 - \Pi_2$ ;  $\Pi_1, \Pi_2$  – наибольшее и наименьшее значения снимаемого припуска, м). Как видно, уменьшить  $\Delta y$  можно увеличением  $n_0$  и  $\varepsilon$ , что достигается уменьшением параметров  $t$ ,  $S_{\text{прод}}$ . Однако, это снижает производительность обработки  $Q = \pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot S_{\text{прод}} \cdot t$  и не эффективно. Более эффективно применение шлифования с заданным натягом в технологической системе, равным величине  $y_{\text{уст}}$  (рис. 3). Это позволит увеличить  $Q$  за счет исключения переходного процесса в технологической системе и обеспечения равенства фактической и номинальной глубин шлифования:

$$Q = \frac{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}} \cdot y_{\text{уст}}}{\sigma} \quad (3)$$

В условиях круглого шлифования с низкой жесткостью технологической системы с основными путями увеличения уточнения  $\varepsilon$  является уменьшение параметров  $D_{\text{дет}}$ ,  $S_{\text{прод}}$ ,  $\sigma / K_{\text{ш}}$  и увеличение  $V_{\text{кр}}$ . Однако диаметры обрабатываемых конусов и чаш – весьма большие, составляющие 2000–5000 мм. Поэтому уточнение принимает малые значения  $\varepsilon \rightarrow 1$ , что существенно снижает производительность обработки. В этих условиях увеличить реально  $\varepsilon$  можно уменьшением  $S_{\text{прод}}$  и  $\sigma / K_{\text{ш}}$ . С целью поддержания производительности обработки  $Q = \pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot S_{\text{прод}} \cdot t$  на заданном уровне, очевидно, с уменьшением  $S_{\text{прод}}$  необходимо глубину шлифования  $t$  увеличивать, применяя глубинное шлифование.

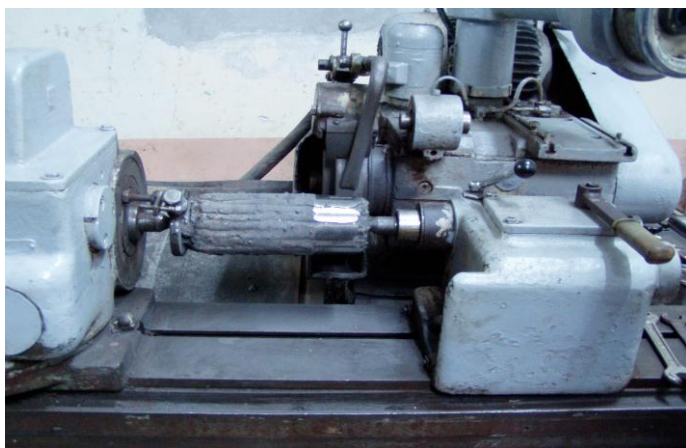


Рис. 5. Шлифование образца на круглошлифовальном станке мод. 3А151

Для количественной оценки уточнения  $\varepsilon$  необходимо знать параметры  $\sigma$ ,  $K_{\text{ш}}$  и  $c$ , которые можно установить экспериментальным путем. Поэтому первоначально были проведены в лабораторных условиях экспериментальные исследования процесса шлифования на

круглошлифовальном станке мод. 3А151 (рис. 5). Обработывался цилиндрический образец с наплавленным материалом Пл-Нп 500Х40НС2 РЦ-Б-С (ГОСТ 26467-85) твердостью  $HRC$  58–59. Обработка производилась по схеме круглого наружного глубинного (однопроходного) продольного шлифования абразивным кругом (14А 50 СТ3 5 К ПП 35 м/с 350×40×127 А) с частотой вращения круга  $n_{кр} = 1400$  об/мин ( $V_{кр} = 25,6$  м/с) без применения СОЖ. Установлено, что жесткость технологической системы составляет  $c = 11,11 \cdot 10^6$  Н/м. Определялись фактическая глубина шлифования  $t_{ф}$ , производительность обработки  $Q$ , эффективная мощность шлифования  $N_{эф}$ , энергоемкость обработки  $\sigma = N_{эф} / Q$ , тангенциальная  $P_z$  и радиальная  $P_y$  составляющие силы резания, коэффициента шлифования  $K_{ш} = P_z / P_y$ . Для установления данных параметров в ходе проведения экспериментальных исследований измерялись значения диаметров образца до и после обработки, и по их разности определялась фактическая глубина шлифования  $t_{ф}$ . Измерялась также мощность электродвигателя шлифовального круга при холостом ходе и при шлифовании. По разности этих значений определялась эффективная мощность шлифования  $N_{эф}$ . На базе планированного полного факторного эксперимента были построены математические модели определения отношения номинальной и фактической глубин шлифования  $t/t_{ф}$ , производительности обработки  $Q$ , тангенциальной  $P_z$  и радиальной  $P_y$  составляющих силы резания, коэффициента шлифования  $K_{ш} = P_z / P_y$ , эффективной мощности шлифования  $N_{эф}$  и энергоемкости обработки  $\sigma = N_{эф} / Q$ .

Построение математических моделей основывается на следующих рассуждениях. Поскольку аналитические выражения упомянутых параметров неизвестны, их представляют в виде линейных полиномов, построение которых возможно в любой точке многофакторного гиперпространства:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_i b_{ij} x_i x_j, \quad (4)$$

где  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_j$ ,  $b_{i,j}$  – коэффициенты регрессии, которые можно получить, используя результаты экспериментов;  $x_i$ ,  $x_j$  – кодированные факторы.

Таблица 1

Построение математической модели на базе планированного полного факторного эксперимента (шлифование в лабораторных условиях)

Факторы	Уровни варьирования			Интервалы
	–1	0	+1	
$t$ , мм	0,1	0,175	0,25	0,075
$S_{прод}$ , мм/мин	60	101	142	41
$V_{дет}$ , м/мин	30	38,4	46,8	8,4

Построение математической модели предусматривает: определение границ существования процесса; кодирование факторов; составление плана-матрицы экспериментов; реализацию плана экспериментов; проверку воспроизводимости опытов; проверку адекватности линейной модели. Предварительно проведенные опыты позволили установить минимальные и максимальные значения скорости детали  $V_{дет}$ , глубины шлифования  $t$ , продольной подачи  $S_{прод}$ . Факторы, уровни варьирования, закодированные в виде +1 и -1, а также интервалы варьирования, являющиеся элементами режима шлифования, приведены в табл. 1.

Уравнение регрессии с учетом парных взаимодействий имеет вид

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_1 x_2 \quad (5)$$

Коэффициенты уравнения регрессии  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$  определяются в соответствии с результатами опытов и уровнями варьирования факторов. В результате получены полиномы вида

$$y = 87,9 + 41,1x_1 + 53,5x_2 - 9,65x_3 + 22,4x_1x_2 - 9,45x_1x_3 - 12,5x_1x_2x_3 \quad (6)$$

Проверка адекватности полученной линейной модели производится подстановкой значений  $x_1, x_2, x_3, x_{1,2}, x_{2,3}, x_{1,3}, x_{1,2,3}$  в соответствии с их знаками в матрицу планирования экспериментов. Для представления математической модели в виде степенной функции необходимо прологарифмировать коэффициенты уравнения регрессии, однако, поскольку при этом невозможно учесть парные взаимодействия  $x_{1,2}, x_{2,3}, x_{1,3}, x_{1,2,3}$ , ими пренебрегаем для упрощения вида математической модели. После подстановки кодированных факторов по известным формулам [5], приводим формулу к натуральным переменным  $t, V_{дет}, S_{прод}$ :

$$x_1 = \left( \frac{2(\lg t - \lg t_{max})}{\lg t_{max} - \lg t_{min}} + 1 \right); \quad x_2 = \left( \frac{2(\lg S - \lg S_{max})}{\lg S_{max} - \lg S_{min}} + 1 \right); \quad x_3 = \left( \frac{2(\lg V - \lg V_{max})}{\lg V_{max} - \lg V_{min}} + 1 \right).$$

После подстановки  $x$  и потенцирования, полином выражается степенной функцией. В результате получены зависимости основных параметров обработки при различных сочетаниях параметров  $t, V_{дет}, S_{прод}$ :

$$Q = 2,54 \times t^{0,9} \times V^{0,005} \times S^{1,01};$$

$$\frac{t}{t_{\phi}} = 2,54 \frac{t^{0,05}}{V_{дет}^{0,026} \times S_{прод}^{0,06}}$$

$$N_{эф} = 27542 \frac{t^{0,57}}{V_{дет}^{0,25} \times S_{прод}^{0,13}}$$

$$\sigma = \frac{165958}{t^{0,21} \times V_{дет}^{0,06} \times S_{прод}^{1,03}}$$

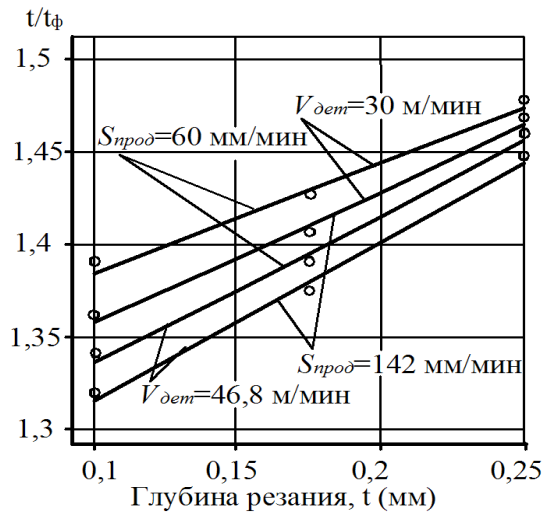
$$P_z = 81,3 \frac{t^{0,57}}{V_{дет}^{0,24} \times S_{прод}^{0,13}}$$

$$P_y = 1524 \frac{t^{1,4}}{V_{дет}^{0,3} \times S_{прод}^{0,03}}$$

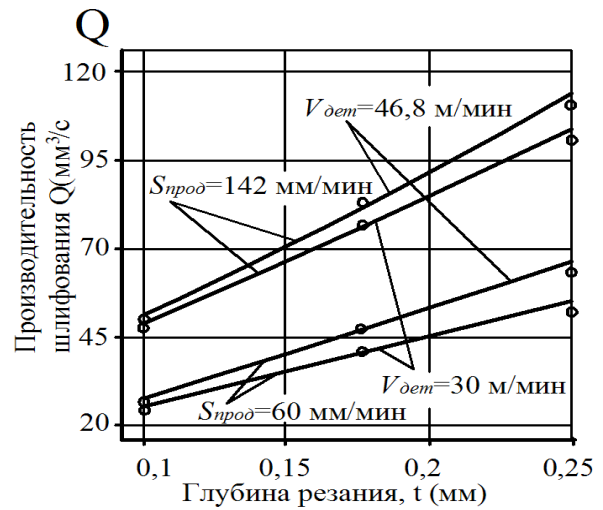
$$K_u = 0,0069 \frac{V_{дет}^{0,62}}{t^{0,82} \times S_{прод}^{0,096}}$$

Расчеты выполнены с помощью электронных таблиц, на основании которых построены графики зависимостей величин  $t/t_{\phi}, Q, N_{эф}, \sigma = N_{эф}/Q, P_y, P_z$  от глубины шлифования  $t$  (рис. 6). На этих рисунках показаны: о – экспериментальные контрольные точки; — расчетные данные (по математической модели). Как видно, параметры шлифования изменяются

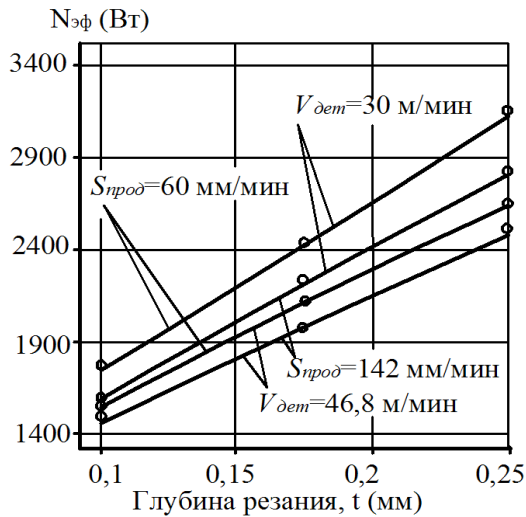
в следующих пределах:  $t/t_{\phi} = 1,331...1,464$ ;  $B_1 = 0,331...0,464$ ;  $\varepsilon = 6,46...8,33$ ;  $Q = 20,3...110,9 \text{ мм}^3/\text{с} = 1218...6654 \text{ мм}^3/\text{мин}$ ;  $N_{\text{эф}} = 1230...2490 \text{ Вт}$ ;  $\sigma = 11810...35110 \text{ МПа}$ ;  $K_{\text{ш}} = 0,11...0,33$ ;  $H = 0,37...1,41 \text{ мм}$ .



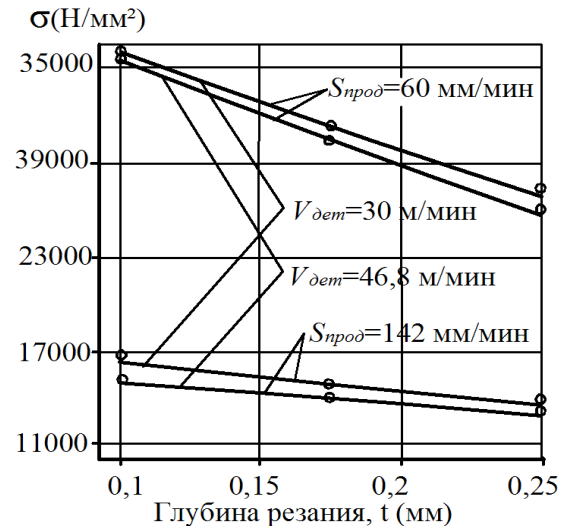
а



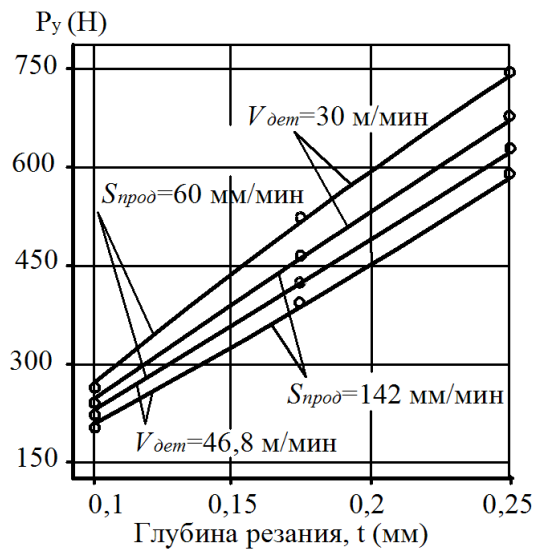
б



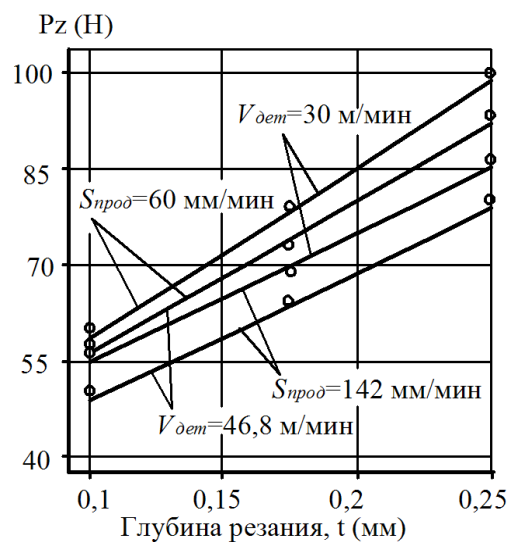
в



г



д



е

Рис. 6. Зависимости  $t/t_{\phi}$  (а),  $Q$  (б),  $N_{\text{эф}}$  (в),  $\sigma$  (г),  $P_y$  (д) и  $P_z$  (е) от глубины шлифования  $t$ .

Относительно небольшие значения  $K_{\text{ш}}$  свидетельствуют о том, что процесс шлифования протекает в условиях достаточно интенсивного трения обрабатываемого материала со связкой круга. Это подтверждается также и относительно большими значениями энергоемкости обработки  $\sigma$ . Вместе с тем, в связи с достаточно высокой жесткостью технологической системы ( $c = 11,11 \cdot 10^6$  Н/м) отношение номинальной и фактической глубин шлифования  $t/t_{\phi}$  небольшое, что указывает на возможность осуществления высокопроизводительного процесса абразивного круглого наружного шлифования труднообрабатываемого наплавленного материала твердостью  $HRC$  58–59. При этом уточнение  $\varepsilon$  принимает относительно большие значения, что позволяет решить задачу устранения погрешности формы обрабатываемой поверхности (обусловленной неравномерностью снимаемого припуска) при высокопроизводительном предварительном шлифовании.

Следовательно, применяя схему круглого наружного глубинного шлифования наплавленного материала, можно обеспечить высокопроизводительный съем значительных припусков и существенно повысить эффективность обработки. Однако, следует отметить, что такой результат получен в лабораторных условиях при использовании круглошлифовального станка повышенной жесткости.

При шлифовании наплавленных контактных поверхностей конусов и чаш в производственных условиях на токарно-карусельном станке добиться таких высоких результатов сложно. Связано это с низкой жесткостью технологической системы, которая, как установлено, равна  $3,42 \cdot 10^6$  Н/м, что в 4 раза ниже жесткости круглошлифовального станка мод. 3А151, на котором проводились экспериментальные исследования в лабораторных условиях. При этом  $D_{\text{дет}} = 5000$  мм больше в 20...50 раз. В этом случае при  $S_{\text{прод}} = 142$  мм/мин расчетное значение уточнения весьма малое  $\varepsilon = 1,032$  ( $t/t_{\phi} = 32,25$ ;  $B_1 = 31,25$ ).

В условиях многопроходного продольного шлифования ( $S_{\text{прод}} = 1-2$  м/мин) значения  $t/t_{\phi}$  многократно увеличиваются, а уточнение  $\varepsilon \rightarrow 1$ . Собственно, этим и объясняется чрезвычайно низкая эффективность (низкая производительность обработки) действующего технологического процесса круглого шлифования наплавленных контактных поверхностей конусов и чаш на токарно-карусельном станке. При этом съем припуска производится за весьма большое количество продольных ходов круга, а исправление погрешности формы обрабатываемой поверхности (обусловленной неравномерностью снимаемого припуска) при предварительном шлифовании практически не происходит. По сути, в процессе шлифования имеет место копирование неровностей обрабатываемой поверхности, что требует последующего длительного выхаживания с целью обеспечения заданной



точности формы обрабатываемой поверхности. Естественно, это требует изыскания новых путей повышения эффективности обработки. Как установлено в ходе экспериментальных исследований, проведенных в лабораторных условиях, процесс шлифования эффективно протекает при глубинах шлифования 0,1...0,25 мм, т.е. при достаточно высокой производительности обработке. Чтобы реализовать данный режим шлифования на токарно-карусельном станке в производственных условиях, необходимо в технологической системе создать натяг  $y_{ycm} = B_1 \cdot t$ , равный  $31,25 \cdot (0,1 \dots 0,25 \text{ мм}) = 3,125 \dots 7,8 \text{ мм}$ . Очевидно, это практически неосуществимо. Реально можно реализовать натяг  $y_{ycm}$  в пределах до 0,5 мм, что соответствует  $t = y_{ycm} / B_1 = 0,5 \text{ мм} / 31,25 = 0,016 \text{ мм}$ . При меньшем значении  $y_{ycm}$  глубина шлифования  $t$  будет еще меньше. Например, при  $y_{ycm} = 0,15 \text{ мм}$  – глубина шлифования  $t = y_{ycm} / B_1 = 0,0048 \text{ мм}$ .

Для эффективного ведения процесса обработки при низкой жесткости технологической системы (т.е. когда  $\varepsilon \rightarrow 1$ ) целесообразно использовать схему круглого шлифования с заданным натягом в технологической системе и небольшой скоростью продольной подачи. Практической реализацией данной схемы может быть глубинное продольное шлифование с небольшой долевой продольной подачей  $S_\partial \ll 1$  и увеличенной скоростью детали (рис. 7). С целью оценки достоверности теоретических решений проведены экспериментальные исследования параметров круглого наружного шлифования наплавленной контактной поверхности большого конуса диаметром  $D_{\partial em} = 5000 \text{ мм}$  на токарно-карусельном станке в производственных условиях ОАО "Азовмаш". Обработывался наплавочный материал ПЛ-Нп 500Х40НС2РЦ-Б-С (ГОСТ 26467-85). Обработка производилась без применения охлаждающей жидкости. Использовался абразивный круг на бакелитовой связке ВФ, усиленный стекловолокном – ПП 500×63×203 14А 22 СТ2 ВФ.

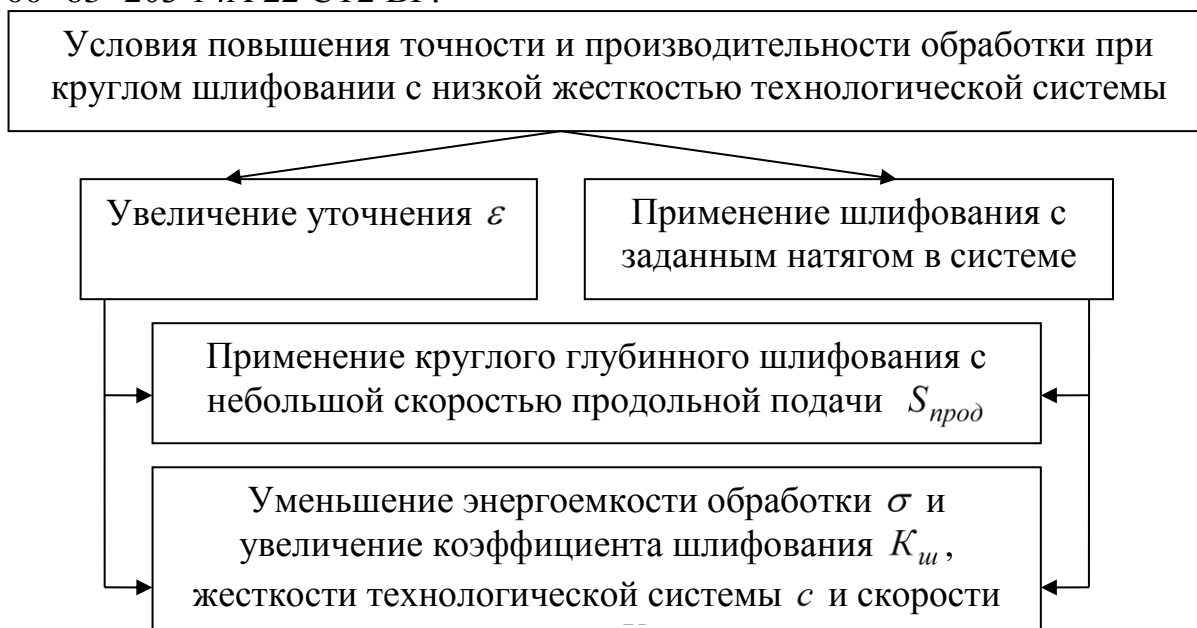


Рис. 7. Структурная схема условий повышения точности и производительности обработки при круглом шлифовании с низкой жесткостью технологической системы.

Традиционно данная операция круглого шлифования выполнялась с применением абразивного круга на бакелитовой связке В, который характеризуется более низкой режущей способностью, чем абразивный круг на бакелитовой связке ВФ. В работе исследовались также абразивные круги большей зернистости: 16 – 18 (по FEPA размер зерна 1,6 – 1,2 мм соответственно). Режимы шлифования:  $V_{кр} = 30$  м/с;  $V_{дет} = 120$  м/мин;  $S_{прод} = 41,5$  мм/мин (ширина шлифования  $H = 5,4$  мм;  $S_{\delta} = 0,086$ );  $y_{уст} = 0,05 \dots 0,45$  мм. В этом случае расчетные значения  $B_1 = 8,13$ ;  $\varepsilon = 1,14$ . Экспериментально установлено, что припуск величиной 5 мм при  $t = 0,15$  мм был удален за 140 продольных ходов круга (время одного продольного хода равно 7 мин). Номинальное количество продольных ходов круга равно  $n = \Pi/t = 33$ . Следовательно,  $t_{\phi} = 0,036$  мм. Тогда  $t/t_{\phi} = 4,1$ ;  $B_1 = t/t_{\phi} - 1 = 3,1$ . Как видно, данное значение  $B_1$  в 2,6 раза меньше исходного (расчетного) значения  $B_1 = t/t_{\phi} - 1 = 8,13$ .

Аналогично были определены значения  $t_{\phi}$ ,  $t/t_{\phi}$  и  $B_1$  для других значений  $t$  (табл. 2). Как видно, во всех случаях значения безразмерного параметра  $B_1$  меньше исходного расчетного значения 8,13. С увеличением номинальной глубины шлифования  $t$  фактическая глубина шлифования  $t_{\phi}$  увеличивается, а безразмерный параметр  $B_1$ , наоборот, уменьшается, принимая значения, до 4-х раз меньше расчетного значения 8,13 (табл. 2). Это указывает на увеличение до 3-х раз фактической глубины шлифования  $t_{\phi}$  и соответственно производительности обработки, что обусловлено уменьшением энергоемкости обработки  $\sigma$  в связи с работой абразивного круга в режиме интенсивного износа и самозатачивания. Таким образом, экспериментально установлено, что при шлифовании по данной схеме достигается эффект обработки. Причем, он достигается как за счет применения шлифования с заданным натягом в технологической системе, так и за счет применения крупнозернистого абразивного круга, обладающего высокой режущей способностью. Производительность обработки при этом принимает значения, превышающие значения производительности обработки, полученные в лабораторных условиях на круглошлифовальном станке повышенной жесткости. Это обусловлено тем, что в лабораторных условиях энергоемкость обработки  $\sigma$  была выше в связи с более высокой твердостью применяемого абразивного круга.

Таблица 2

## Экспериментальные значения параметров шлифования

$t$ , мм	0,1	0,15	0,45
$t_\phi$ , мм	0,019	0,036	0,145
$Q$ , мм <sup>3</sup> /с	206,32	390,93	1574,7
$t/t_\phi$	5,2	4,1	3,1
$B_1$	4,2	3,1	2,1
$\varepsilon$	1,31	1,47	1,9
$q$ , мм <sup>3</sup> абразива / мм <sup>3</sup> материала	0,4	0,5	4

С целью определения минимально возможной энергоемкости обработки  $\sigma = N_{\varepsilon\phi} / Q$  в реальном процессе шлифования был проведен эксперимент с глубиной шлифования  $t=1$  мм;  $V_{кр}=30$  м/с;  $V_{дем}=7,5$  м/мин;  $S_{прод}=41,5$  мм/мин. Экспериментально установлено, что эффективная мощность шлифования равна  $N_{\varepsilon\phi}=16,5$  кВт, отношение  $t/t_\phi=3$ , а фактическая производительность обработки –  $Q=2625$  мм<sup>3</sup>/с. Тогда  $\sigma=6286$  МПа. Это фактически соответствует значениям энергоемкости обработки  $\sigma$  (условного напряжения резания), полученным Рыбицким В.А. [6] при микрорезании единичным зерном (рис. 8). Полученные результаты свидетельствует о том, что в общем энергетическом балансе процесса шлифования кругом ПП 500×63×203 14А 22 СТ2 ВФ наплавленного

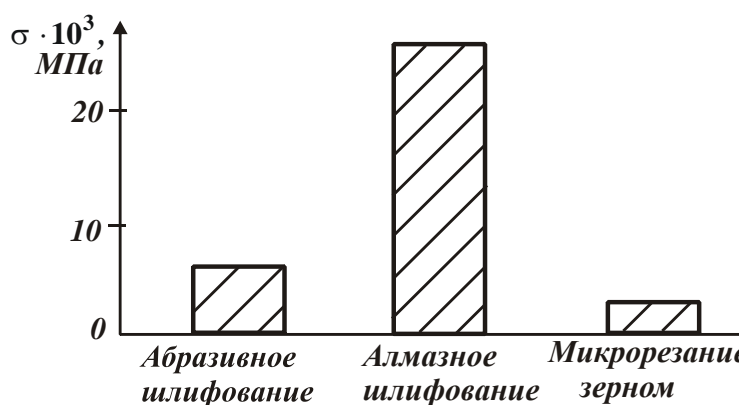


Рис. 8. Значения энергоемкости обработки  $\sigma$  для разных условий обработки.

материала Пл-Нп 500Х40НС2РЦ-Б-С (ГОСТ 26467-85) преобладает доля энергии резания, а доля трения связки круга с материалом незначительна в связи с высокой режущей способностью круга, работающего в режиме самозатачивания.

Таким образом показано, что за счет обеспечения работы абразивного круга в режиме интенсивного самозатачивания практически исключаются потери энергии шлифования, связанные с трением связки круга с обрабатываемым материалом. В резании участвуют практически только абразивные зерна. Это позволяет в максимальной степени использовать режущие свойства круга и максимально увеличить уточнение  $\varepsilon$  (для данных значений  $D_{дем}$  и  $c$ ). Установлено, что уточнение  $\varepsilon$  при шлифовании по данной схеме увеличивается и принимает значения 1,31...1,9 (табл. 2). Эти

значения значительно выше значений уточнений, установленных на основе действующего технологического процесса шлифования, которые не превышают  $\varepsilon=1,032$ .

Кроме того, уменьшение энергоемкости обработки  $\sigma$  до минимально возможного значения, обусловленного участием в резании лишь абразивных зерен, создает объективные предпосылки повышения качества обработки за счет снижения тепловой напряженности процесса и исключения образования на обрабатываемых поверхностях различного рода температурных дефектов (прижогов и микротрещин). Однако, такой режим работы круга приводит к его интенсивному износу. В связи с этим нами проводились экспериментальные исследования удельного износа круга  $q$ , равного отношению объема изношенной части круга к объему снятого материала. При этом определялся объем снятого материала абразивным кругом до его полного износа. Установлено, что для условий обработки при шлифовании кругом ПШ 500×63×203 14А 22 СТ2 ВГ данный параметр принимает достаточно большие значения – 0,5...4 мм<sup>3</sup> абразива/мм<sup>3</sup> материала (табл. 2). При шлифовании других материалов (по экспериментальным данным проф. Филимонова Л.Н. [7]) удельный износ круга  $q$  меньше и лишь при шлифовании твердых сплавов превышает его (рис. 9). Это указывает на то, что рассматриваемые наплавленные материалы принадлежат к классу труднообрабатываемых материалов.

Экспериментально установлено, что с увеличением номинальной глубины шлифования  $t$  удельный износ круга  $q$  увеличивается и при  $t=0,45$  мм принимает достаточно большое значение  $q=4$  мм<sup>3</sup> абразива/мм<sup>3</sup> материала. Осуществление процесса шлифования с такой интенсивностью износа круга экономически нецелесообразно. Экономически обоснованными являются значения  $q=0,5...1$  мм<sup>3</sup> абразива/мм<sup>3</sup> материала, т.е. с этой точки зрения шлифование эффективно осуществлять с  $t=0,1...0,15$  мм. Так, установлено, что при шлифовании с  $t=0,15$  мм одного конуса диаметром 5000 мм расходуется до 8 абразивных кругов. При этом размерный износ круга за его один продольный ход составляет до 1 мм. Это значительно превышает глубину шлифования и указывает на необходимость ее постоянного регулирования в процессе обработки. Компенсировать размерный износ абразивного круга можно за счет осуществления непрерывной или дискретной радиальной подачи в пределах одного продольного хода круга. Интенсивный износ круга, с одной стороны, увеличивает затраты на приобретение кругов, а с другой стороны, позволяет поддерживать его высокую режущую способность. Следовательно, повышенный размерный износ круга способствует снижению интенсивности трения связи с кругом и энергоемкости обработки. Причем, применение абразивных кругов большей зернистости: 16 – 18 (по FEPA размер зерна 1,6 – 1,2 мм соответственно) позволяет еще в большей степени уменьшить энергоемкость обработки. В результате на обрабатываемых поверхностях не образуются прижоги и происходит устранение неравномерности снимаемого

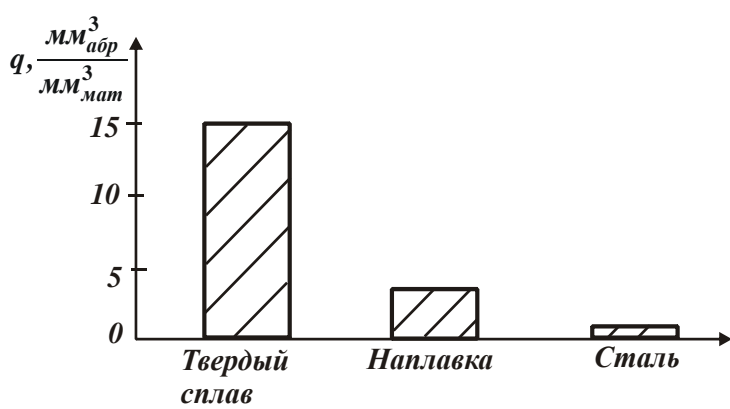


Рис. 9. Значения удельного износа круга  $q$  при шлифовании разных материалов.

припуска на операции предварительного шлифования, что снижает трудоемкость окончательного шлифования (которое по длительности такое же как и предварительное шлифование) с обеспечением

требований по точности обработки. Общая трудоемкость обработки снижается в 2 раза. Шероховатость поверхности при предварительном шлифовании составляет  $R_a=1,2\dots1,7$  мм, при окончательном шлифовании –  $R_a=0,6\dots0,8$  мм.

Проводились также экспериментальные исследования алмазного электроэрозионного шлифования наплавочных материалов. Установлено, что, несмотря на интенсивное электроэрозионное воздействие на рабочую поверхность алмазного круга на металлической связке, происходит его засаливание, в результате чего энергоемкость обработки  $\sigma$  почти на порядок выше, чем при абразивном шлифовании (рис. 8). Поэтому процесс шлифования в таких условиях малоэффективен, более предпочтительно применение схемы абразивного круглого шлифования с заданным натягом в технологической системе, реализуемой путем применения глубинного продольного шлифования с  $S_\partial < 0,1$  и увеличенной скоростью детали  $V_{\text{дет}} = 50\dots120$  м/мин ( $t=0,1\dots0,2$  мм;  $S_{\text{прод}} < 42$  мм/мин).

**Выводы.** Установлено, что по сравнению с обычным круглым многопроходным продольным шлифованием (осуществляемым с небольшими глубинами шлифования  $t=0,01\dots0,02$  мм на токарно-карусельном станке в производственных условиях) предложенная схема абразивного круглого шлифования с заданным натягом в технологической системе позволяет увеличить производительность обработки. Установлено также, что данная схема позволяет до 3-х раз увеличить производительность обработки по сравнению с глубинным шлифованием образца на круглошлифовальном станке. Основным резервом эффективного применения данной схемы шлифования в производственных условиях является увеличение жесткости системы, т.к. за счет применения крупнозернистого абразивного круга ПП 500×63×203 14А 22 СТ2 ВF на бакелитовой связке (усиленной стекловолокном) все резервы, связанные с уменьшением энергоемкости обработки, фактически использованы.

### Список литературы

1. Самойлов С.И. Технология тяжелого машиностроения / С.И. Самойлов. – М.: Машиностроение, 1967. – 596 с.

2. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями / Э.В. Рыжов, С.А. Клименко, О.Г. Гуцаленко. – К.: Наук. думка, 1994. – 180 с.
3. Рыбицкий В.А. Опыт внедрения алмазного шлифования деталей с защитными покрытиями / В.А. Рыбицкий. – К.: Общество ”Знание” УССР, 1987. – 23 с.
4. Новиков Ф.В. Обоснование оптимальной кинематической схемы круглого шлифования по критериям качества и производительности обработки / Ф.В. Новиков, В.А. Андилахай // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2010. – Вип. 106. – С. 52-67.
5. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 254 с.
6. Рыбицкий В.А. Силовые зависимости и обрабатываемость износостойких материалов при микрорезании единичным алмазным зерном / В.А. Рыбицкий // Труды 5-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2002. – С. 57-61.
7. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование / Л.Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 245 с.