

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

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, проф.

(Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнеця, Харьков, Украина)

Андилахай В.А., канд. техн. наук

(ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», Мариуполь, Украина)

Предложена схема абразивного круглого шлифования с заданным натягом в технологической системе, которая по сравнению с обычным круглым многопроходным продольным шлифованием по жесткой схеме (осуществляемым с небольшими глубинами шлифования 0,01...0,02 мм на токарно-карусельном станке в производственных условиях) позволяет обеспечить требуемое качество обработки и увеличить производительность. Установлено, что основным резервом эффективного применения данной схемы шлифования в производственных условиях является увеличение жесткости системы, т.к. все резервы уменьшения энергоемкости обработки и повышения качества и производительности фактически использованы.

Ключевые слова: круглое шлифование, абразивный круг, твердость материала, жесткость системы, толщина среза, износ круга.

Запропоновано схему абразивного круглого шліфування з заданим натягом в технологічній системі, яка порівняно зі звичайним круглим багатопрохідним поздовжнім шліфуванням за жорсткою схемою (здійснюваним з невеликими глибинами шліфування 0,01 ... 0,02 мм на токарно-карусельному верстаті в виробничих умовах) дозволяє забезпечити необхідну якість обробки і збільшити продуктивність. Встановлено, що основним резервом ефективного застосування даної схеми шліфування в виробничих умовах є збільшення жорсткості системи, тому що всі резерви зменшення енергоємності обробки і підвищення якості та продуктивності фактично використані.

Ключові слова: кругле шліфування, абразивний круг, твердість матеріалу, жорсткість системи, товщина зрізу, знос круга.

A circular abrasive grinding circuit with a predetermined interference in the process system, which compared to conventional multi-pass round the longitudinal grinding on the rigid scheme (carried out with small grinding depth of 0.01 ... 0.02 mm Turning and turning machines in a production environment) ensures the required processing quality and increase productivity. It is found that the main application of the effective reserve grinding circuit operating conditions is to increase the stiffness of the system, since the all reserves reduce energy consumption and improve processing quality and productivity is actually used.

Keywords: cylindrical grinding, grinding wheel, material hardness, rigidity of the system, slice thickness, wear range.

Постановка проблемы. Применение износостойких наплавочных материалов для восстановления рабочих поверхностей деталей машин позволяет существенно повысить ресурс их работы. Однако, в связи с высокой твердостью наплавленных материалов их дальнейшая механическая обработка шлифованием характеризуется высокой трудоемкостью. Например, процесс кругло-

го шлифования контактных рабочих поверхностей с износостойкими наплавленными материалами больших и малых конусов и чаш (диаметром 5000 мм и 2000 мм) засыпных аппаратов доменных печей для обеспечения требуемых параметров точности и качества обрабатываемых поверхностей протекает с высокой трудоемкостью.

Основными причинами низкой эффективности обработки являются плохая обрабатываемость шлифованием износостойких наплавленных материалов, таких как 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 (поясов) и низкая жесткость технологической системы (токарно-карусельного станка, на котором осуществляется процесс шлифования).

Как установлено экспериментально, применение алмазного электроэрозионного шлифования также оказалось малоэффективным вследствие интенсивного засаливания алмазного круга и потери его режущей способности. Поэтому повысить эффективность действующего технологического процесса шлифования можно путем снижения силовой и тепловой напряженности шлифования за счет выбора новых прогрессивных схем шлифования и оптимальных режимов резания. Важно обеспечить устранение неравномерности снимаемого припуска на операции предварительного шлифования, что сократит продолжительность окончательного шлифования.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросы механической обработки высокотвердых наплавочных материалов отражены в многочисленных публикациях [1-3].

В работе [1] приведены результаты экспериментальных исследований лезвийной и абразивной обработки алмазными инструментами наплавочных материалов твердостью HRC 50-55, нанесенных на рабочие поверхности изделий металлургического назначения.

Работа [2] посвящена исследованию процесса шлифования алмазными кругами на металлических связках наплавочных материалов большей твердости – HRC 60-62. Отмечается, что в этом случае трудоемкость обработки значительно выше в связи с высокой силовой напряженностью процесса и интенсивным износом и засаливанием алмазного круга. Это указывает на необходимость исследований процесса по изысканию новых технологических возможностей эффективной обработки шлифованием наплавочных материалов высокой твердости, которые используются для упрочнения контактных поверхностей крупногабаритных изделий металлургического назначения.

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.

Изложение основного материала. Первоначально определены условия устранения неравномерности снимаемого припуска на операции предварительного шлифования при относительно низкой жесткости технологической систе-

мы. 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. 1):

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

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 па-

раметр; $\varepsilon = 1 + 1/B_1$ – уточнение на проходе круга; t – глубина шлифования, м; $S_{прод}$ – скорость продольной подачи, м/с; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с; σ – условное напряжение резания, Н/м² (энергоёмкость обработки, Дж/м³); $K_{ш} = P_z / P_y$ – коэффициент шлифования; P_z, P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н; c – жесткость технологической системы, Н/м; $D_{дет}$ – диаметр детали, м.

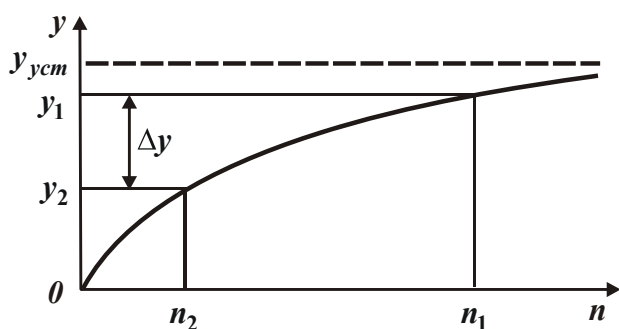


Рис. 1 – Зависимость величины y от количества проходов n

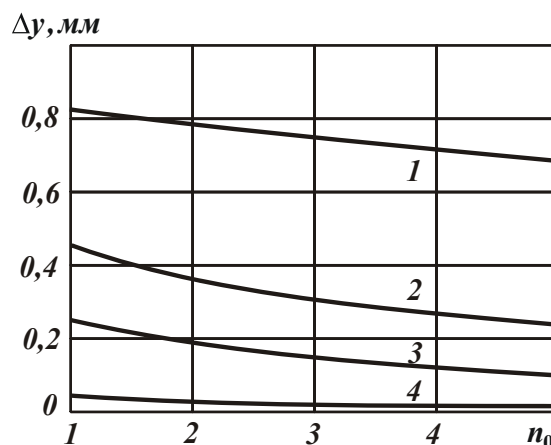


Рис. 2 – Зависимость Δy от n_0 : 1 – $\varepsilon = 1,1$; 2 – $\varepsilon = 1,5$; 3 – $\varepsilon = 2$; 4 – $\varepsilon = 5$

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

На рис. 2 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 Δy (где $n_0 = n_1 - n_2 = \Delta \Pi / t$; $\Delta \Pi = \Pi_1 - \Pi_2$; Π_1, Π_2 – наибольшее и наименьшее значения снимаемого припуска, м). Как видно, уменьшить Δy можно увеличением n_0 и ε , 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. 1). 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 ε 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 ε 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. Для количественной оценки уточнения ε 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. Обработывался цилиндрический образец с наплавленным материалом ПЛ-НП 500Х40НС2 РЦ-Б-С (ГОСТ 26467-85) твердостью НРС 58–59. Обработка производилась по схеме круглого наружного глубинного (однопроходного) продольного шлифования абразивным кругом (14А 50 СТЗ 5 К ПП 35 м/с 350×40×127 А) с частотой вращения круга $n_{\text{кр}} = 1400$ об/мин ($V_{\text{кр}} = 25,6$ м/с) без применения СОЖ. Установлено, что жесткость технологической системы составляет $c = 11,11 \cdot 10^6$ Н/м. Определялись фактическая глубина шлифования $t_{\text{ф}}$, производительность обработки Q , эффективная мощность шлифования $N_{\text{эф}}$, энергоемкость обработки $\sigma = N_{\text{эф}} / Q$, тангенциальная P_z и радиальная P_y составляющие силы резания, коэффициента шлифования $K_{\text{ш}} = P_z / P_y$. Для установления данных параметров в ходе проведения экспериментальных исследо-

ваний измерялись значения диаметров образца до и после обработки, и по их разности определялась фактическая глубина шлифования t_{ϕ} .

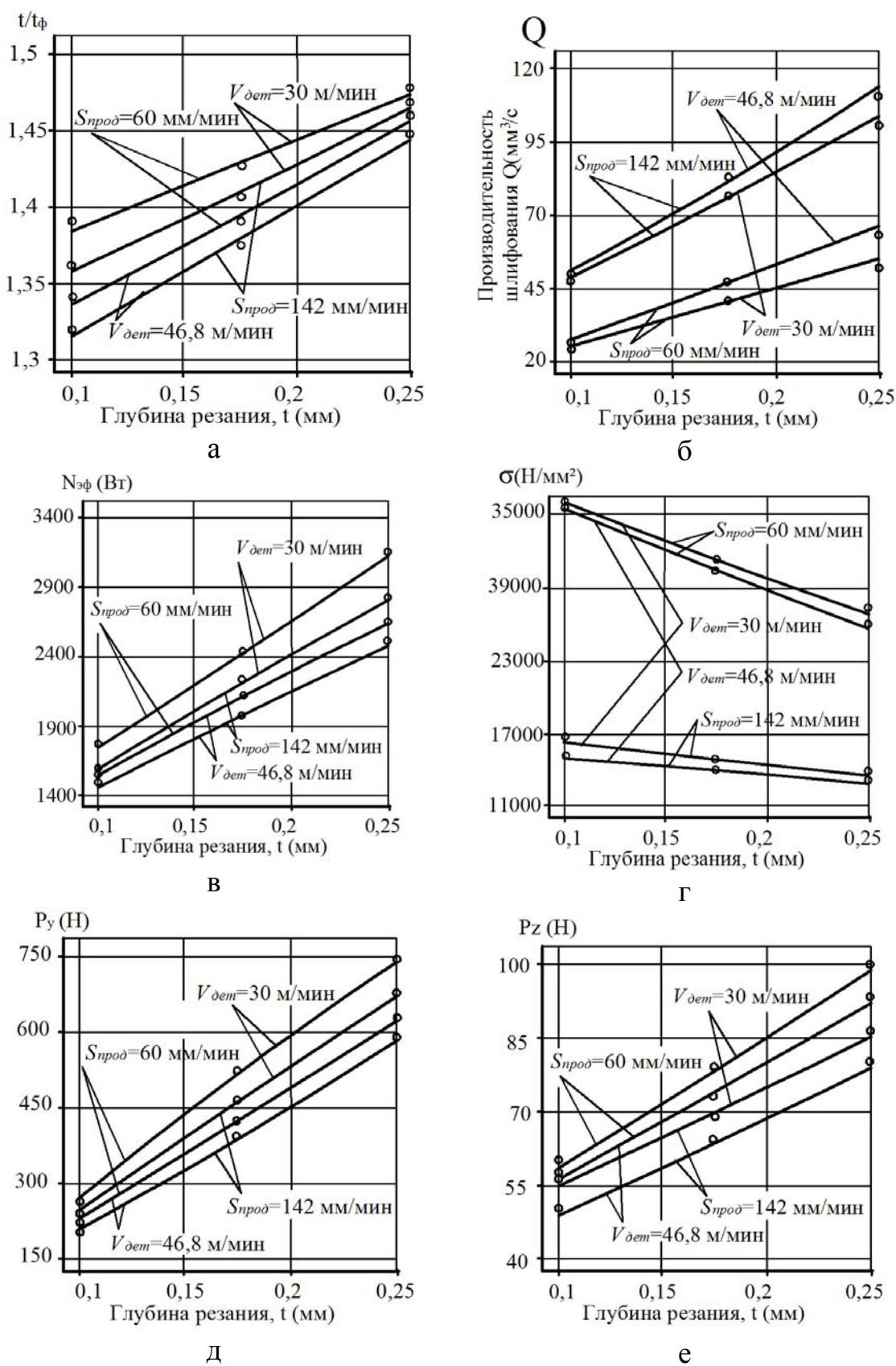


Рис. 3 – Зависимости t/t_{ϕ} (а), Q (б), $N_{эф}$ (в), σ (г), P_y (д) и P_z (е) от t

Измерялась также мощность электродвигателя шлифовального круга при холостом ходе и при шлифовании. По разности этих значений определялась эффективная мощность шлифования $N_{эф}$. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 3.

Как установлено, параметры шлифования изменяются в следующих пределах: $t/t_{\phi}=1,331\dots1,464$; $B_1=0,331\dots0,464$; $\varepsilon=6,46\dots8,33$; $Q=20,3\dots110,9$ мм³/с = 1218...6654 мм³/мин; $N_{эф}=1230\dots2490$ Вт; $\sigma=11810\dots35110$ МПа; $K_{ин}=0,11\dots0,33$; $H=0,37\dots1,41$ мм.

Относительно небольшие значения $K_{ин}$ 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 σ .

Вместе с тем, в связи с достаточно высокой жесткостью технологической системы ($c=11,11\cdot10^6$ Н/м) отношение номинальной и фактической глубин шлифования t/t_{ϕ} небольшое, что указывает на возможность осуществления высокопроизводительного процесса абразивного круглого наружного шлифования труднообрабатываемого наплавленного материала твердостью *HRC* 58–59. При этом уточнение ε 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 $3,42\cdot10^6$ Н/м, что в 4 раза ниже жесткости круглошлифовального станка мод. 3А151, на котором проводились экспериментальные исследования в лабораторных условиях. При этом $D_{дет}=5000$ мм больше в 20...50 раз. В этом случае при $S_{прод}=142$ мм/мин расчетное значение уточнения весьма малое $\varepsilon=1,032$ ($t/t_{\phi}=32,25$; $B_1=31,25$).

В условиях многопроходного продольного шлифования ($S_{прод}=1-2$ м/мин) значения t/t_{ϕ} 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 $0,1 \dots 0,25$ мм, т.е. при достаточно высокой производительности обработки. 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 $31,25 \cdot (0,1 \dots 0,25 \text{ мм}) = 3,125 \dots 7,8$ мм. Очевидно, это практически неосуществимо. Реально можно реализовать натяг y_{ycm} в пределах до $0,5$ мм, что соответствует $t = y_{ycm} / B_1 = 0,5 \text{ мм} / 31,25 = 0,016$ мм. При меньшем значении y_{ycm} глубина шлифования t будет еще меньше. Например, при $y_{ycm} = 0,15$ мм – глубина шлифования $t = y_{ycm} / B_1 = 0,0048$ 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 $S_\delta \ll 1$ и увеличенной скоростью детали.

Для оценки достоверности теоретических решений проведены экспериментальные исследования параметров круглого наружного шлифования наплавленной контактной поверхности конуса диаметром $D_{дет} = 5000$ мм на токарно-карусельном станке в производственных условиях ПАО "Азовмаш". Обработывался наплавочный материал ПЛ-Нп 500Х40НС2РЦ-Б-С (ГОСТ 26467-85). Обработка производилась без применения охлаждающей жидкости абразивным кругом на бакелитовой связке ВФ, усиленной стекловолокном – ПП 500×63×203 14А 22 СТ2 ВФ.

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; $S_\delta = 0,086$); $y_{ycm} = 0,05 \dots 0,45$ 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 $B_1 = t/t_\phi - 1 = 8,13$.

Аналогичным образом были определены значения t_ϕ , t/t_ϕ и B_1 для других значений t (табл. 1). 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_ϕ увеличивается, а безразмерный параметр B_1 , наоборот, уменьшается, принимая значения, до 4-х раз меньше расчетного значения 8,13 (табл. 1). Это указывает на увеличение до 3-х раз фактической глубины шлифования t_ϕ и соответственно производительности обработки, что обусловлено уменьшением энергоемкости обработки σ 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 σ была выше в связи с более высокой твердостью применяемого абразивного круга.

Таблица 1

Экспериментальные значения параметров шлифования

t , мм	0,1	0,15	0,45
t_ϕ , мм	0,019	0,036	0,145
Q , мм ³ /с	206,32	390,93	1574,7
t/t_ϕ	5,2	4,1	3,1
B_1	4,2	3,1	2,1
ε	1,31	1,47	1,9
q , мм ³ абразива / мм ³ материала	0,4	0,5	4

С целью определения минимально возможной энергоемкости обработки $\sigma = N_{\text{эф}} / Q$ в реальном процессе шлифования был проведен эксперимент с глубиной шлифования $t=1$ мм; $V_{\text{кр}}=30$ м/с; $V_{\text{дет}}=7,5$ м/мин; $S_{\text{прод}}=41,5$ мм/мин.

Экспериментально установлено, что эффективная мощность шлифования равна $N_{эф} = 16,5$ кВт, отношение $t/t_{ф} = 3$, а фактическая производительность обработки – $Q = 2625$ мм³/с. Тогда $\sigma = 6286$ МПа. Это фактически соответствует значениям энергоемкости обработки σ (условного напряжения резания), полученным Рыбицким В.А. [5] при микрорезании единичным зерном (рис. 4). Полученные результаты свидетельствует о том, что в общем энергетическом балансе процесса шлифования кругом ПП 500×63×203 14А 22 СТ2 ВФ наплавленного 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 шлифовального 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 ε (для данных значений $D_{дет}$ и c). Установлено, что уточнение ε при шлифовании по данной схеме увеличивается и принимает значения 1,31...1,9 (табл. 1). Эти значения значительно выше значений уточнений, установленных на основе действующего технологического процесса шлифования, которые не превышают $\varepsilon = 1,032$.

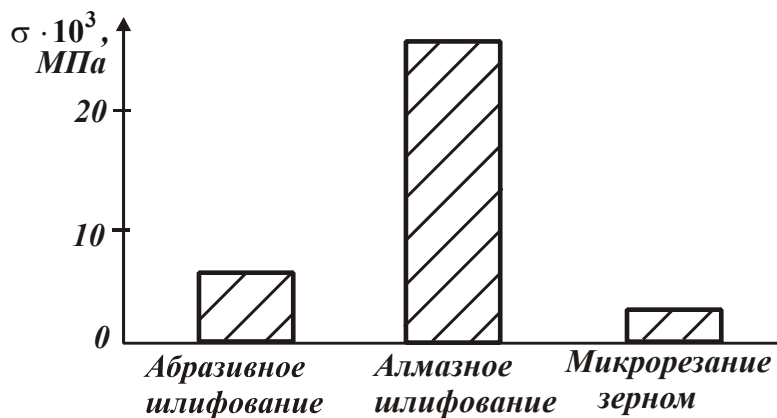


Рис. 4 – Значения энергоемкости обработки σ

Кроме того, уменьшение энергоемкости обработки σ 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 ПП 500×63×203 14А 22 СТ2 ВФ данный параметр принимает достаточно большие значения – 0,5...4 мм³ абразива/мм³ материала (табл. 1). При шлифовании других материалов (по экспериментальным данным проф. Филимонова Л.Н. [6]) удельный износ круга q меньше и лишь при шлифовании твердых сплавов превышает его (рис. 5). Это указывает на то, что рассматриваемые наплавленные материалы принадлежат к классу труднообрабатываемых материалов.

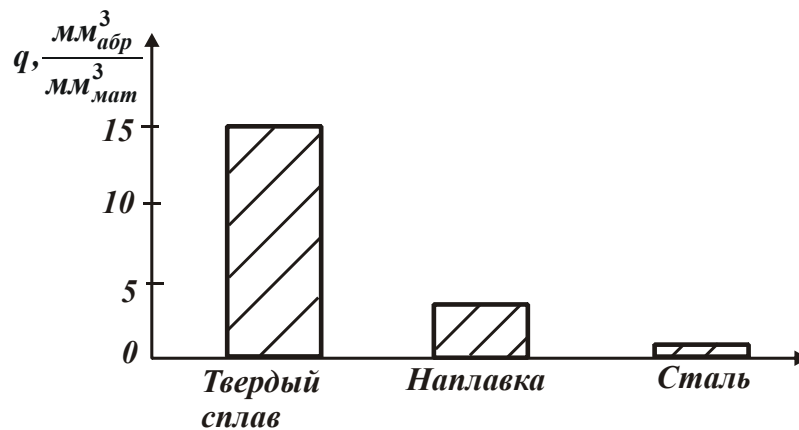


Рис. 5 – Значения удельного износа круга q

Экспериментально установлено, что с увеличением номинальной глубины шлифования t удельный износ круга q увеличивается и при $t=0,45$ мм принимает достаточно большое значение $q=4$ (мм³ абразива/мм³ материала). Осуществление процесса шлифования с такой интенсивностью износа круга экономически нецелесообразно. Экономически обоснованными являются значения $q=0,5...1$ (мм³ абразива/мм³ 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

снятого 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 $R_a = 1,2 \dots 1,7$ мкм, при окончательном шлифовании – $R_a = 0,6 \dots 0,8$ мкм.

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 σ почти на порядок выше, чем при абразивном шлифовании (рис. 4). 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 $S_\delta < 0,1$ и увеличенной скоростью детали $V_{дет} = 50 \dots 120$ м/мин ($t = 0,1 \dots 0,2$ мм; $S_{прод} < 42$ мм/мин).

Выводы. В работе проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований круглого шлифования рабочих контактных поверхностей с износостойкими наплавленными поверхностями конусов и чаш засыпных аппаратов доменных печей. Предложена схема абразивного круглого шлифования с заданным натягом в технологической системе, которая по сравнению с обычным круглым многопроходным продольным шлифованием по жесткой схеме (осуществляемым с небольшими глубинами шлифования $t = 0,01 \dots 0,02$ мм на токарно-карусельном станке в производственных условиях) позволяет обеспечить требуемое качество обработки и увеличить производительность. Установлено, что основным резервом эффективного применения данной схемы шлифования в производственных условиях является увеличение жесткости системы, поскольку за счет применения крупнозернистого абразивного круга ПП 500×63×203 14А 22 СТ2 ВФ на бакелитовой связке (усиленной стекловолокном) все резервы, связанные с уменьшением энергоемкости обработки и повышением качества и производительности, фактически использованы.

Список литературы: 1. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями / Э.В. Рыжов, С.А. Клименко, О.Г. Гуцаленко. – К.: Наук. думка, 1994. – 180 с. 2. Новиков Г.В. Повышение эффективности алмазно-искрового шлифования деталей с высокопрочными покрытиями: дис. ... кандидата техн. наук: 05.02.08 / Новиков Григорий Васильевич. – Харьков, 1989. – 210 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. – Харьков: НТУСГ, 2010. – Вып. 106. – С. 52-67. 5. Рыбицкий В.А. Силовые зависимости и обрабатываемость износостойких материалов при микрорезании единичным алмазным зерном / В.А. Рыбицкий // Физические и компьютерные технологии: Труды 5-й Международной научно-технической конференции. – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2002. – С. 57-61. 6. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование / Л.Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 245 с.