

УДК 621.923

Андилахай В.А.

**УСЛОВИЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ  
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ  
МАТЕРИАЛОВ**

*Проведены исследования и разработана эффективная технология круглого наружного шлифования поверхностей с износостойкими наплавленными материалами крупногабаритных деталей. Показано, что применение схемы абразивного круглого шлифования с заданным натягом в технологической системе по сравнению с обычным круглым многопроходным продольным шлифованием по жесткой схеме позволяет обеспечить требуемые параметры точности и производительности обработки.*

**Ключевые слова:** *круглое наружное шлифование, производительность обработки, рабочие контактные поверхности, износостойкая наплавленная поверхность.*

Процесс круглого шлифования наплавленных поверхностей крупногабаритных деталей характеризуется высокой трудоемкостью, являющейся следствием низкой производительности процесса обработки. Основными причинами низкой эффективности обработки являются высокая прочность обрабатываемого материала, высокая твердость, неравномерность снимаемого припуска, а также большая площадь обрабатываемых поверхностей. Производственный опыт показал, что применение алмазного электроэрозионного шлифования также оказалось малоэффективным вследствие интенсивного засаливания алмазного круга и потери его режущей способности, при этом компоновка токарно-карусельного станка не позволяет применять технологическую жидкость, поскольку на таких станках не предусмотрена защита шпиндельного узла от попадания влаги. В связи с этим, можно предположить возможность повышения производительности шлифования за счет снижения силовой напряженности процесса шлифования благодаря выбору и обоснованию прогрессивной схемы шлифования, а также выбору рациональных режимов резания.

Механическая обработка высокотвердых наплавленных материалов рассматривалась в ряде публикаций [1-3]. Например, в работе [1] приведены результаты экспериментальных исследований лезвийной и абразивной обработки алмазными инструментами материалов, наплавленных на рабочие поверхности изделий металлургического назначения. Работы [2, 3] посвящены исследованию процесса шлифования алмазными кругами на металлических связках материалов большой твердости. Отмечается, что в этом случае трудоемкость обработки значительно выше в связи с высокой силовой напряженностью процесса, интенсивным износом и засаливанием алмазного круга. Это указывает на необходимость изыскания новых технологических возможностей эффективной обработки шлифованием наплавленных материалов высокой твердости, которые используются для упрочнения контактных поверхностей крупногабаритных изделий металлургического назначения.

Цель работы – повышение 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.

На основе подхода к обработке с учетом технологической наследственности погрешность формы обрабатываемой поверхности при круглом шлифовании по жесткой схеме определится следующим образом (рис. 1):

**Машинобудування і зварювальне виробництво**

Режим доступу: <http://eir.pstu.edu/handle/123456789/2>

$$\delta y = y_1 - y_2, \quad (1)$$

где  $y_1, y_2$  – упругие перемещения, образующиеся при обработке участков поверхности с наибольшим и наименьшим снимаемыми припусками, м.

В соответствии с результатами, полученными в работе [4], уменьшение погрешности обработки можно выразить через коэффициент уточнения с каждым новым проходом круга

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

где  $n_1, n_2$  – проходы круга;

$y_{уст} = C_1 \cdot t$  – упругое перемещение при установившемся процессе

шлифования, м;  $C_1 = \frac{s_{прод} \cdot \sigma \cdot \pi \cdot d_{дет}}{V_{кр} \cdot c \cdot k_{ш}}$  – безразмерный параметр;

$\varepsilon = 1 + 1/C_1$  – уточнение с каждым новым проходом круга;

$t$  – глубина шлифования, м;

$s_{прод}$  – продольная подача, м/с;

$V_{кр}$  – скорость резания (шлифования), м/с;

$\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup> (энергоемкость обработки, Дж/м<sup>3</sup>);

$k_{ш}$  – коэффициент шлифования, представляющий собой отношение главной составляющей силы резания к радиальной;

$c$  – жесткость технологической системы, Н/м;

$d_{дет}$  – диаметр детали, м.

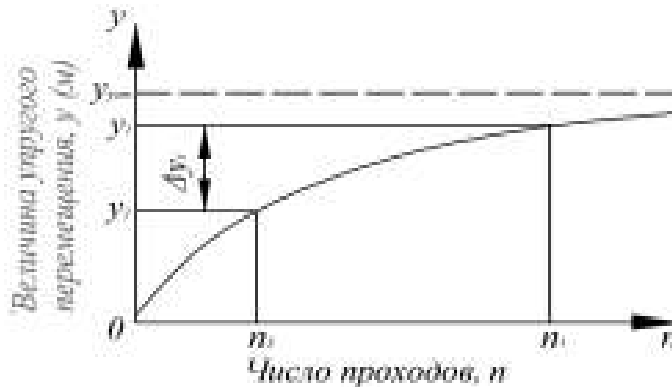


Рис. 1 – Зависимость величины упругого перемещения  $y$  от количества проходов  $n$

Согласно зависимости (1), уменьшить  $\delta_y = y_1 - y_2 = y_{уст} \cdot (\varepsilon^{-n_2} - \varepsilon^{-n_1})$  можно уменьшением величины  $y_{уст}$  и увеличением  $\varepsilon$  и  $n$ . Уменьшение  $y_{уст} = C_1 \cdot t$  и увеличение  $\varepsilon$  связано с уменьшением  $C_1$  путем уменьшения параметров  $\sigma, s_{прод}, d_{дет}$  и увеличения  $c, k_{ш}$  и  $V_{кр}$ . Увеличение количества проходов круга  $n$  предполагает обеспечение установившегося во времени процесса шлифования, при котором  $y_1$  и  $y_2 \rightarrow y_{уст}$  (см. рис. 1). Однако это возможно при относительно больших значениях уточнения  $\varepsilon > 1$ . В противном случае получим копирование обрабатываемой поверхности по проходам круга, что имеет место в

действующем процессе круглого шлифования. Поэтому необходимо увеличивать  $\varepsilon$  за счет уменьшения  $C_1$ .

На рис. 2 приведены рассчитанные по преобразованной зависимости (1)

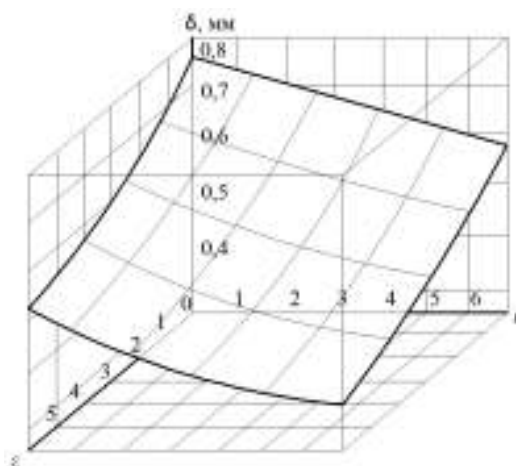
$$\delta y = \frac{\delta Z}{(\varepsilon - 1)} \cdot \varepsilon^{-n_2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon^{-n_0})}{n_0} \quad (2)$$

значения  $\delta y$  (где  $n_0 = n_1 - n_2 = \delta Z / t$ ;  $\delta Z = Z_1 - Z_2$ ;  $Z_1, Z_2$  – наибольшее и наименьшее значения снимаемого припуска, м). Как видно, уменьшить  $\delta y$  можно увеличением  $n_0$  и  $\varepsilon$ , что достигается уменьшением параметров  $\dagger, s_{\text{прод}}$ . Однако, это снижает производительность обработки  $G = \pi \cdot d_{\text{дет}} \cdot s_{\text{прод}} \cdot t$  и неэффективно.

Более эффективно применение шлифования с заданным натягом в технологической системе, равным величине  $y_{\text{уст}}$  (см. рис. 1). Это позволит увеличить  $G$  за счет исключения переходного процесса в технологической системе и обеспечения равенства фактической и номинальной глубин шлифования:

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

В условиях круглого шлифования с низкой жесткостью технологической системы  $c$  основными путями увеличения уточнения  $\varepsilon$  являются уменьшение параметров



**Рис. 2** – Зависимость упругого смещения  $\delta y$  от числа проходов  $n$  и уточнения геометрической формы с каждым новым проходом круга  $\varepsilon$

$d_{\text{дет}}, s_{\text{прод}}, \sigma / K_{\text{ш}}$  и увеличение  $V_{\text{кр}}$ . Однако, поскольку диаметры обрабатываемых конусов и чаш относительно велики и составляют 2000–5000 мм, 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  $G = \pi \cdot d_{\text{дет}} \cdot s_{\text{прод}} \cdot t$  на заданном уровне, очевидно, с уменьшением  $s_{\text{прод}}$  необходимо глубину шлифования  $\dagger$  увеличивать, применяя глубинное шлифование. Для количественной оценки уточнения  $\varepsilon$  необходимо знать параметры  $\sigma, K_{\text{ш}}$  и  $c$ , которые можно установить экспериментальным путем. Поэтому первоначально были проведены

экспериментальные исследования процесса шлифования на круглошлифовальном станке мод. 3A151 в лабораторных условиях. Обработывали цилиндрический образец диаметром 80 мм с упрочненным слоем, полученным наплавкой порошковой лентой 500X40HC2 РЦ-Б-С твердостью HRC 58–59. Обработку производили по схеме круглого наружного глубинного 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. Опытным путем установлено, что жесткость технологической системы круглошлифовального станка мод. 3A151 в текущий период эксплуатации составляет  $c = 11 \cdot 10^6$  Н/м. Кроме того, определяли фактическую глубину шлифования  $t_{ф}$ , производительность обработки  $G$ , радиальную  $P_y$ , составляющую силы резания. Для определения жесткости технологической системы  $c$  измеряли смещение заготовки и смещение шпинделя с помощью индикатора часового типа под действием заданной силы, приложенной через динамометр. Фактическую глубину шлифования  $t_{ф}$  определяли как половину разности диаметров образца до и после обработки. Для определения эффективной мощности шлифования  $N_{эф}$  измеряли мощность электродвигателя шлифовального круга при холостом ходе и при шлифовании. По разности этих значений определяли эффективную мощность шлифования  $N_{эф}$ . Результаты экспериментальных исследований влияния номинальной глубины и величины продольной подачи на производительность шлифования (рис. 3), на отношение номинальной и фактической глубин шлифования (рис. 4), а также на величину радиальной составляющей силы резания (рис. 5) представлены ниже.

Как установлено, параметры шлифования изменяются в следующих пределах (табл.

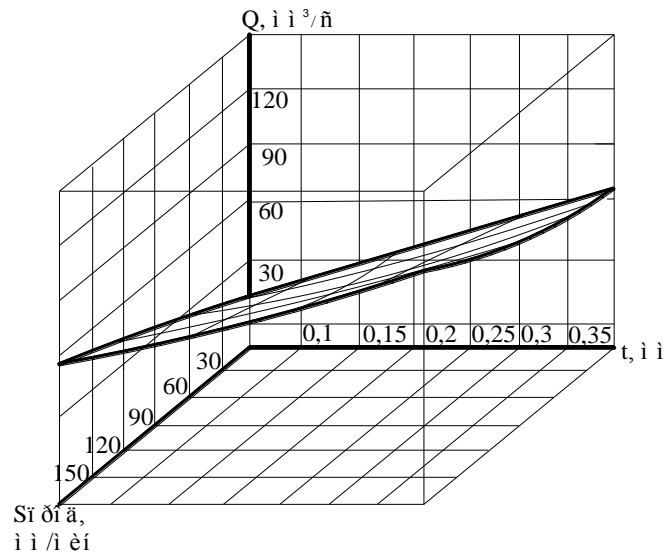
1):

**Таблица 1**

Пределы параметров шлифования

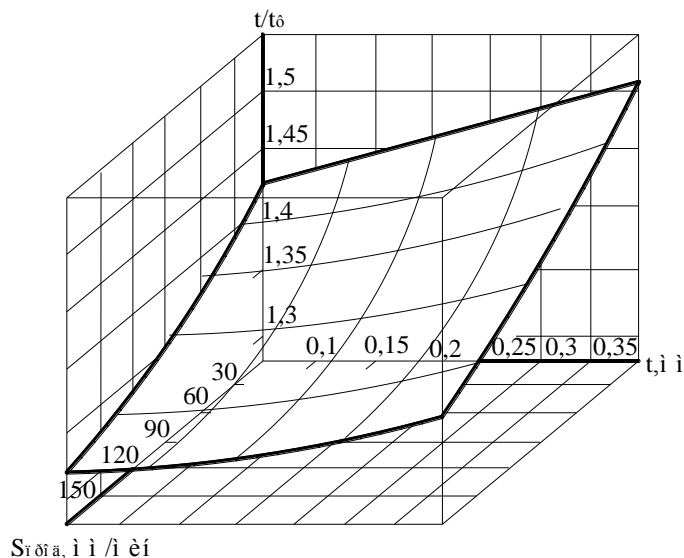
№ пп	Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
1.	$t/t_{ф}$	1,331	1,464
2.	$C_1$	0,331	0,464
3.	$\varepsilon$	6,46	8,33
4.	$G$ , мм <sup>3</sup> /с	20,3	110,9
5.	$G_1$ , мм <sup>3</sup> /мин	1218	6654
6.	$N_{эф}$	1230	2490

В связи с достаточно высокой жесткостью технологической системы ( $c = 11 \cdot 10^6$  Н/м), отношение номинальной и фактической глубин шлифования  $t/t_{ф}$  небольшое, что указывает на возможность осуществления высокопроизводительного процесса абразивного круглого наружного шлифования труднообрабатываемого наплавленного материала твердостью HRC 58–59.

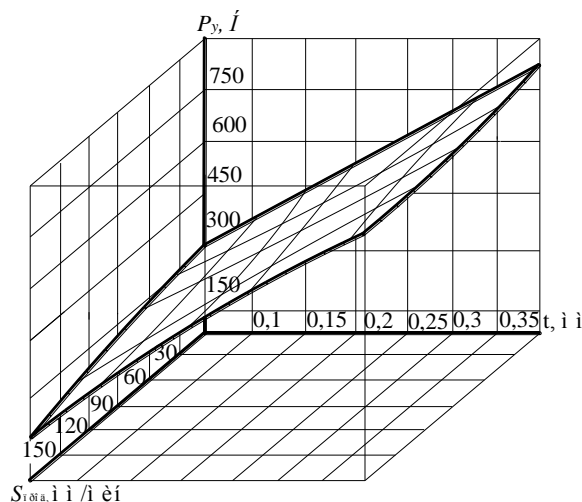


**Рис. 3** – Зависимость производительности шлифования  $G$  от глубины шлифования  $t$  и продольной подачи  $S_{\text{прод}}$

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 сьем значительных припусков и существенно повысить эффективность обработки.



**Рис. 4** – Зависимость отношения номинальной глубины шлифования к фактической  $t/t_{\phi}$  от номинальной глубины шлифования  $t$  и продольной подачи  $S_{\text{прод}}$



**Рис. 5** – Зависимость радиальной составляющей силы резания  $P_y$  от номинальной глубины шлифования  $i$  и продольной подачи  $S_{\text{прод}}$

Вместе с тем, при шлифовании наплавленных контактных поверхностей конусов и чаш в производственных условиях (на станках токарной группы вместо круглошлифовальных станков) 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 60 раз. В этом случае при  $s_{\text{прод}} = 142$  мм/мин расчетное значение уточнения весьма малое  $\varepsilon = 1,032$  ( $t/t_{\phi} = 32,25$ ;  $C_1 = 31,25$ ).

В условиях многопроходного шлифования ( $s_{\text{прод}} = 500 - 800$  мм/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 сьем припуска производится за весьма большое количество продольных ходов круга, а исправления 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  $y_{\text{уст}} = C_1 \cdot t$ , 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  $y_{\text{уст}}$  в пределах до  $0,5$  мм, что соответствует  $t = y_{\text{уст}} / C_1 = 0,5 \text{ мм} / 31,25 = 0,016$  мм. При меньшем значении  $y_{\text{уст}}$  глубина



шлифования  $l$  будет еще меньше. Например, при  $y_{уст} = 0,15$  мм – глубина шлифования  $t = y_{уст} / C_1 = 0,0048$  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. С целью оценки достоверности теоретических решений проведены экспериментальные исследования параметров круглого наружного шлифования наплавленной контактной поверхности конуса диаметром  $d_{оem} = 5000$  мм на токарно-карусельном станке в производственных условиях. Обработывали наплавочный материал ПЛ-Нп 500Х40НС2РЦ-Б-С (ГОСТ 26467-85). Обработку производили без применения охлаждающей жидкости. Использовали абразивный круг на бакелитовой связке ВФ, усиленный стекловолокном – ПП 500×63×203 14А 22 СТ2 ВФ.

В работе исследовали абразивные круги зернистости: 16 – 18 (по FEPA размер зерна 1,6 – 1,2 мм соответственно). В этом случае расчетное (исходное) значение  $C_1 = 8,13$ .

Экспериментально установлено, что припуск величиной 5 мм при  $l = 0,15$  мм был удален за 140 продольных ходов круга (время одного продольного хода равно 7 мин). Номинальное количество продольных ходов круга равно  $n = Z / t = 33$ . Следовательно,  $t_\phi = 0,036$  мм. Тогда  $t / t_\phi = 4,1$ ;  $C_1 = t / t_\phi - 1 = 3,1$ . Как видно, данное значение  $C_1$  в 2,6 раза меньше исходного (расчетного) значения  $C_1 = t / t_\phi - 1 = 8,13$ .

Аналогичным образом определили значения  $t_\phi$ ,  $t / t_\phi$  и  $C_1$  для других значений  $l$  (см. табл. 1). Как видно, во всех случаях значения безразмерного параметра  $C_1$  меньше исходного расчетного значения 8,13. С увеличением номинальной глубины шлифования  $l$  фактическая глубина шлифования  $t_\phi$  увеличивается, а безразмерный параметр  $C_1$ , наоборот, уменьшается, принимая значения, до 4-х раз меньше расчетного значения 8,13. 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 требуемый 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.

## ВЫВОДЫ

На основе проведенных исследований предложена схема абразивного круглого шлифования с заданным натягом в технологической системе, которая по сравнению с

обычным круглым многопроходным продольным шлифованием по жесткой схеме позволяет обеспечить требуемое качество обработки и увеличить производительность. В результате применения крупнозернистого абразивного круга на бакелитовой связке все резервы, связанные с уменьшением энергоемкости обработки и повышением производительности шлифования, исчерпаны. Основным резервом эффективного применения данной схемы шлифования в производственных условиях является увеличение жесткости технологической системы.

*Список использованных источников*

1. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями / Э.В. Рыжов, С.А. Клименко, О.Г. Гуцаленко. – К.: Наук. думка, 1994. – 180с.
2. Новиков Г.В. Повышение эффективности алмазно-искрового шлифования деталей с высокопрочными покрытиями: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Новиков Григорий Васильевич. – Харьков, 1989. – 210с.
3. Рыбицкий В.А. Опыт внедрения алмазного шлифования деталей с защитными покрытиями / В.А. Рыбицкий. – К.: Общество "Знание" УССР, 1987. – 23с.
4. Новиков Ф.В. Обоснование оптимальной кинематической схемы круглого шлифования по критериям качества и производительности обработки / Ф.В. Новиков, В.А. Анділахай // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2010. – Вип. 106. – С. 52-67.

**Анділахай В. А.**

**УМОВИ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ШЛІФУВАННЯ  
ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ДЕТАЛЕЙ З ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ**

*Проведено дослідження й розроблена ефективна технологія круглого зовнішнього шліфування поверхонь зі зносостійкими наплавленими матеріалами великогабаритних деталей. Показано, що застосування схеми абразивного круглого шліфування із заданим натягом в технологічній системі в порівнянні із звичайним круглим багатопрохідним поздовжнім шліфуванням за жорсткою схемою дозволяє забезпечити необхідні параметри точності і продуктивності обробки.*

**Ключові слова:** *кругле зовнішнє шліфування, продуктивність обробки, робочі контактні поверхні, зносостійка наплавлена поверхня.*

**Andilahay V. A.**

**TERMS IMPROVE PERFORMANCE GRINDING OF LARGE PARTS OF THE  
HARD MATERIALS**

*The research and developed an effective technology round outer grinding surfaces with wear-resistant weld material of large parts. It is shown that the use of abrasive cylindrical grinding circuit with a predetermined preload in the process system in comparison with conventional round multipass longitudinal grinding on the rigid circuit enables the required parameters of accuracy and processing capacity.*

**Keywords:** *round outer grinding, processing performance, the working contact surfaces, the wear resistance of the weld surface.*

Рецензент: д.т.н., проф. Суглобов В.В.

Статья поступила 10.01.2016

**Машинобудування і зварювальне виробництво**

Режим доступу: <http://eir.pstu.edu/handle/123456789/2>