

2.7. ENERGY BALANCE OF WORKS AT INTERFERING GRINDING

Проведен сравнительный анализ и выведены аналитические зависимости для расчета показателей, характеризующих режущую способность прерывистого и сплошного шлифовальных кругов. Установлено, что стабильность процесса шлифования прерывистыми кругами определяется наличием фронтальных поверхностей на режущих выступах, работа которых обеспечивает равномерное самозатачивание абразивных зерен по всему профилю режущего выступа с сохранением оптимального угла атаки к плоскости резания.⁴³ Стабилизация процесса шлифования с позиции максимальной производительности, оптимальной теплонапряженности и минимального износа обеспечивается автоматическим саморегулированием угла атаки.⁴⁴ Физико-механические показатели качества поверхностного слоя шлифованных деталей в значительной степени зависят от способности абразивного круга сохранять режущую способность во времени.⁴⁵

Обоснование критериев выбора методов шлифования, исследование температурного поля движущего источника тепла рассмотрены в работах Yi, J., Jin, T., Deng, Z.⁴⁶ и Firas M. F. Al Quran⁴⁷.

Исследование режущей способности абразивного инструмента и её влияние на качество поверхностного слоя деталей проводилось в работах Jin, T., Yi, J., Li, P.⁴⁸, Mohammad Essa Matarneh⁴⁹ и Patil, R. A., Gombi, S. L.⁵⁰

Режущая способность обычных и прерывистых кругов оценивается по удельной интенсивности шлифования k_0 (мм³/(с·н)), по весу металла, снимаемого единицей рабочей поверхности шлифовального круга в единицу времени k_p г/(с·см²) и по коэффициенту шлифования k_{III} .

Изменение показателей, характеризующих режущую способность обычного и прерывистого – ($l_1=36$ мм; $l_2=24$ мм) кругов от продолжительности шлифования стали 18ХНВА на режиме $V_{kp} = 34,5$ м/с; $V_d = 0,1$ м/с; $F_y = 12$ Н/м представлены на рис. 1.

⁴³ Narasimha, M. Improving cutting Tool Life a Review / M. Narasimha, K. Sridhar, et al. // International Journal of Engineering Research and Development. – 2013. – Vol. 7. – Iss.1. – P. 67-75.:

⁴⁴ Handbook of Machining with Grinding Wheels, Second Edition / Ioan D. Marinescu, Mike P. Hitchiner. CRC Press. – 2016. – 750 p.:

⁴⁵ Kito, Y., Katsuma, T., Yanase, Y., Nose, Y. (2015). Latest Technologies for High-Precision, High-Efficiency Gear Grinding Processing. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 52 (3), 5-8:

⁴⁶ Yi, J., Jin, T., Deng, Z. (2019). The temperature field study on the three-dimensional surface moving heat source model in involute gear form grinding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 103 (5-8), 3097-3108. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03752-9>:

⁴⁷ Firas M. F. Al Quran, F. M. F. A. Q. (2018). Theoretical Corroboration of the Selection Criteria of the Breaking-in and Shape-Copy Gear Teeth Grinding Methods. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, 8 (1), 389-392. doi: <https://doi.org/10.24247/ijmperdfeb201842>

⁴⁸ Jin, T., Yi, J., Li, P. (2016). Temperature distributions in form grinding of involute gears. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 88 (9-12), 2609-2620. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8971-z>:

⁴⁹ Mohammad Essa Matarneh, M. E. M. (2018). Improvement of Abrasive and Edge Cutting Machining Efficiency through Theoretical Analysis of Physical Conditions, International Journal of Machining and Production Engineering Research and Development, 8 (2), 249-262. doi: <https://doi.org/10.24247/ijimperdapr201828> :

⁵⁰ Patil, R. A., Gombi, S. L. (2018). Experimental study of cutting force on a cutting tool during machining using inverse problem analysis. Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 40 (10). doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1411-2>:

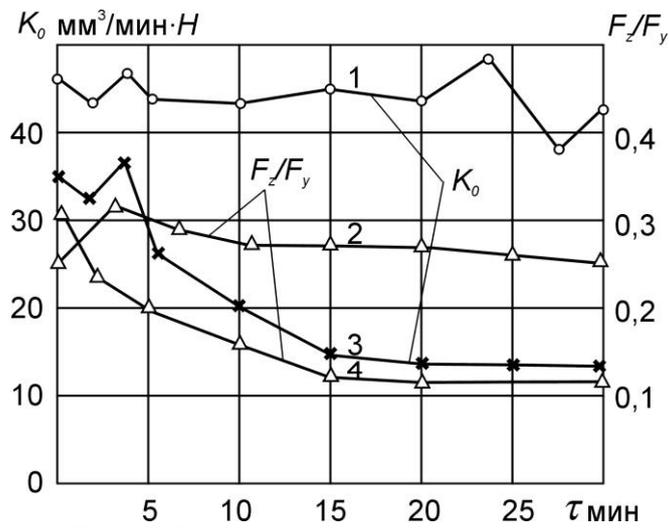


Рис. 1. Зависимость k_0 и $k_{ш}$ от времени

По мере затупления режущих зерен удельная интенсивность шлифования k_0 и соотношение сил F_z/F_y снижаются. Например, после правки кругов отношение сил F_z/F_y при шлифовании обычным сплошным кругом 24A25НСМ26К5 равно 0,31, а при шлифовании прерывистым кругом – 0,27. После 30-и минутного периода работы обычного круга отношение составляющих силы резания F_z/F_y уменьшалось до 0,12 (кривая 4), а прерывистого – до 0,25 (кривая 2). Удельная интенсивность шлифования k_0 сплошного круга уменьшалась от 35 до 12 мм³/(мин·Н), а прерывистого круга – от 45 до 40 мм³/(мин·Н).

Приведенные экспериментальные данные показывают, что обычные круги за счет затупления зерен и засорения пор отходами шлифования после 30-и минутного периода работы практически полностью теряют свою режущую способность.

Стабилизация режущей способности прерывистых шлифовальных кругов в течение длительного времени работы связана с возникновением в упругой системе шпиндельного узла вынужденных высокочастотных колебаний с частотой порядка 300...1000 Гц, которые существенно изменяют условия трения и износа зерен, уменьшают сопротивление сходу стружки, облегчают процесс ее образования и устраняют налипание металла на режущие зерна.

Кроме того, наличие вырезов на шлифовальном круге, наклоненных к оси его вращения или радиальных пазов на торце способствуют подаче в зону резания воздушного потока под повышенным давлением. Мощная струя воздуха выдувает стружку из зоны резания, интенсифицируя процесс ее окисления и сгорания. Окисленная стружка становится хрупкой, приобретает шаровидную форму (рис. 2), не налипает на поверхность зерен и не внедряется в поры круга.

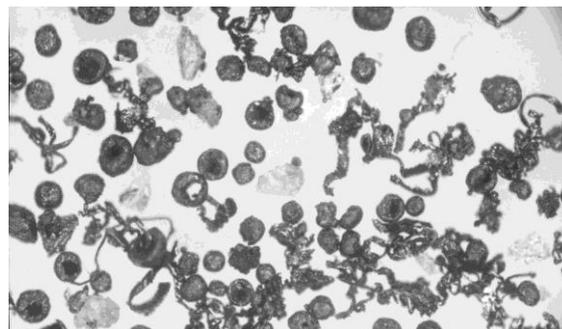


Рис.2. Окисленная стружка

На рис. 3. показан прерывистый круг, проточная часть которого выполнена под углом 20° к оси вращения, с радиусами средней линии впадины на входе $r_1=85$ мм и на выходе $r_2=92$ мм.



Рис. 3. Вид прерывистого шли-фовального круга

Характеристика круга 24A40CM26K5 $l_1=22$ мм; $l_2=20$ мм; $n=14$; $\alpha=30^\circ$; $\delta=20^\circ$.

Наличие вырезов на круге с прерывистой рабочей поверхностью увеличивает расстояние между режущими зёрнами и глубину внедрения их в металл.

Известно, что при малых глубинах микрорезания возрастает доля энергии, расходуемая на трение и уменьшается работа, затрачиваемая на разрушение материала.

Процесс деформации и разрушения металла при шлифовании зависит от радиуса скругления режущих кромок зёрен, угла при вершине и физических свойств обрабатываемого материала.

Увеличение радиусов закругления зёрен по мере их износа смещает точку начала стружкообразования в область больших глубин.

При прерывистом шлифовании, под воздействием динамических нагрузок, режущие зёрна, расположенные на передней кромке выступов, выкрашиваются. На режущих выступах формируется фронтальная поверхность. При наличии фронтальной поверхности происходит выравнивание нагрузки на режущие зёрна и равномерное самозатачивание круга по всей поверхности выступа. Если угол атаки фронтальной поверхности режущего выступа будет меньше оптимального, то основная часть нагрузки будет восприниматься режущими зёрнами, расположенными на передней кромке режущего выступа.

Более интенсивное выкрашивание режущих зёрен, расположенных на передней кромке режущего выступа, приведет к увеличению угла атаки. Угол атаки будет возрастать до тех пор, пока не произойдет выравнивание нагрузки на режущие зёрна всей фронтальной поверхности выступа.

Если угол атаки фронтальной поверхности будет больше оптимального, то основная нагрузка будет восприниматься режущими зёрнами, расположенными в области задней кромки режущего выступа. Более интенсивное выкрашивание режущих зёрен, расположенных в области задней кромки выступа, приведет к уменьшению угла атаки.

Угол атаки будет уменьшаться до тех пор, пока не достигнет оптимального значения, при котором произойдет выравнивание нагрузки на режущие зёрна.

Проведенный анализ свидетельствует о том, что при прерывистом шлифовании происходит саморегулирование процесса, т. е. оптимальный угол атаки устанавливается автоматически. На основании экспериментальных данных, приведенных на рис. 4, произведены расчеты параметров $k_{ш,рез}$; f ; $f/k_{ш}\%$; η ; $[\sigma]_{сж}=979$ мПа; $HV=5120$ мПа; $2\gamma=120^\circ$.

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Из анализа данных, приведенных в табл.1, видно, что с увеличением времени обработки параметр $k_{ш,рез}$ уменьшается как при сплошном, так и при прерывистом шлифовании. Однако интенсивность его снижения различна.

Таблица 1

Время $\tau \cdot 10^2 \text{ с}$	$k_{\text{ш.рез}}$		f		$f/k_{\text{ш}}\%$		η	
	Сплош	Прерв	Сплош	Прерв	Сплош	Прерв	Сплош	Прерв
0	0,177	0,169	0,400	0,331	69,0	66,2	0,783	0,800
3	0,126	0,164	0,354	0,356	73,7	68,4	0,888	0,812
6	0,100	0,157	0,170	0,343	68,0	68,6	0,931	0,828
9	0,075	0,150	0,100	0,320	55,5	66,6	0,956	0,845
12	0,058	0,147	0,055	0,300	42,3	66,6	0,975	0,851
18	0,048	0,141	0,052	0,290	17,3	66,0	0,982	0,861

За 30-минутный период шлифования стали 12Х2Н4А сплошным кругом 24А25СМ26К5 параметр $k_{\text{ш.рез}}$ уменьшился с 0,177 до 0,048 т. е. в 3,7 раза, при шлифовании прерывистым кругом – с 0,169 до 0,141, т. е. 1,2 раза.

Эти данные свидетельствуют о высокой режущей способности прерывистых кругов, которая сохраняется на достаточно высоком уровне длительное время. Доля работы, затрачиваемой на трение оценивается параметром $f/k_{\text{ш}}$.

При прерывистом шлифовании в исследуемом временном интервале работы круга отношение $f/k_{\text{ш}}$ стабильно сохраняет свое значение на постоянном уровне приблизительно 66%.

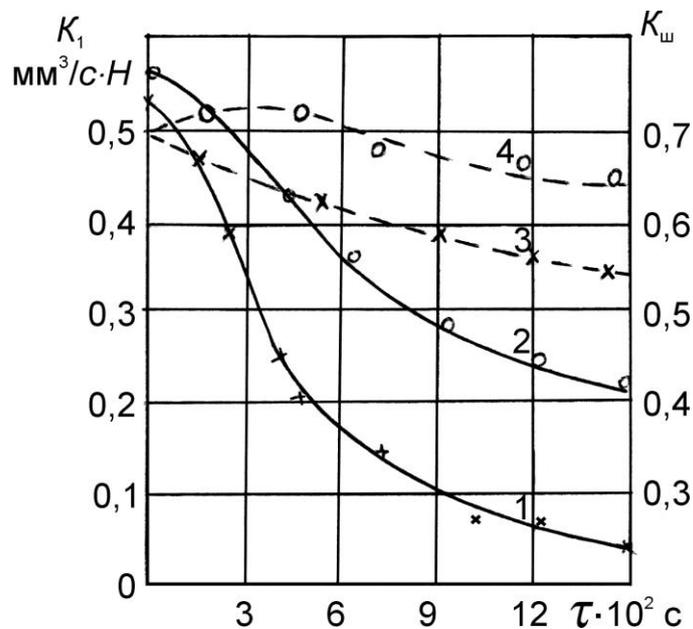


Рис. 4. Экспериментальные данные

При сплошном шлифовании доля работы, затрачиваемая на трение за исследуемый период времени работы круга снижается с 69% до 17,3%. Однако из этого нельзя делать вывод о том, что с уменьшением доли работ, затрачиваемых на трение возрастает доля энергии, затрачиваемой на резание.

При очень малых глубинах внедрения зерен в металл возрастают затраты энергии трения металла о площадки изношенных зерен и уменьшаются затраты энергии на трение металла со связкой.

Коэффициент трения абразивных зерен о металл значительно меньше коэффициента трения связки о металл.

При малых глубинах шлифования в трении в основном участвуют зерна. Поэтому и доля энергии, затрачиваемой на трение $f/k_{\text{ш}}\%$ после 30-минутного периода шлифования снижается до 17,3%.

В табл. 2 представлены расчетные данные параметров $k_{ш.рез}$, f и $f/k_{ш}$ при сплошном и прерывистом шлифовании стали 12Х2Н4А кругом 24А25СМ26К (после правки и 10-минутного периода работы).

Таблица 2

τ, C	$\sigma \cdot 10^4 \text{ мПа}$		$k_{ш}$		$k_{ш.рез}$		f		$f/k_{ш} \%$	
	Спл.	Прер	Спл.	Прер	Спл.	Прер	Спл.	Прер	Спл.	Прер
0	12,5	9,5	0,85	0,7	0,217	0,227	0,633	0,473	74,4	67,5
$6 \cdot 10^2$	22,2	10,2	0,55	0,65	0,131	0,211	0,419	0,439	76,1	67,5

Режущая способность прерывистого круга в интервале 10-минутного периоде работы сохраняется постоянной. Это утверждение подтверждает параметр $k_{ш.рез}$. Режущая способность сплошного круга уменьшилась.

Параметр $k_{ш.рез}$ уменьшился на 40% (с 217 до 131). Доля энергии, затрачиваемая на трение $f/k_{ш}$ при прерывистом шлифовании остается постоянной. Условное напряжение σ увеличилось при сплошном шлифовании с $\sigma = 125000$ мПа до $\sigma = 222000$ мПа, а при прерывистом от 95000 мПа до 102000 мПа.

Нанесение на рабочую поверхность импрегнатора, состав которого содержит: стеариновую кислоту – 60–65%, олеиновую кислоту 20–25%, ацетамид – остальное дает дополнительное повышение режущей способности кругов.

Например, после 10-минутного временного интервала шлифования неимпрегнированным сплошным кругом стали 12Х2Н4А параметр $k_{ш.рез} = 0,131$, а после шлифования импрегнированным кругом параметр $k_{ш.рез}$ возрос до 0,165. Условное напряжение резания уменьшилось с $\sigma = 222000$ мПа до 140000 мПа, т. е. на 40%.

Параметр, характеризующий долю энергии, затрачиваемой на трение, $f/k_{ш}$ уменьшился с 76,1% до 70,0%. Импрегнирование прерывистых кругов дает также дополнительное повышение эксплуатационных характеристик процесса шлифования.

Например, параметр $k_{ш.рез}$ увеличился с 0,211 до 0,238, условное напряжение резания уменьшилось с $\sigma = 102000$ мПа до 80000 мПа, параметр $f/k_{ш}$ уменьшился с 67,5 до 63,3%.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что прерывистые круги, работающие в режиме самозатачивания, имеют более острые режущие кромки зерен и значительно большую производительность.

Прерывистые круги при определенных условиях профилирования режущих выступов работают как диагональная лопаточная машина, осуществляющая прокатку СОЖ через прорезы круга.

Прерывистые круги имеют значительно больший коэффициент режущей способности $k_{ш.рез}$. Импрегнирование кругов дает дополнительное повышение режущей способности.

Однако для внедрения прерывистых кругов на операциях, имеющих длительный цикл обработки, например, при шлифовании зубчатых колес на различных типах зубошлифовальных станков или шлифовании ходовых винтов требуется установить: во-первых функциональную связь коэффициента шлифования с режущей способностью шлифовальных кругов, а во-вторых разработать способ стабилизации режущей способности шлифовальных кругов во времени.

Силовая расчетная схема, приведенная на рис. 5, позволяет установить связь параметра $\eta = X/H$ с коэффициентом шлифования $k = F_z/F_y$ и коэффициентом трения f .

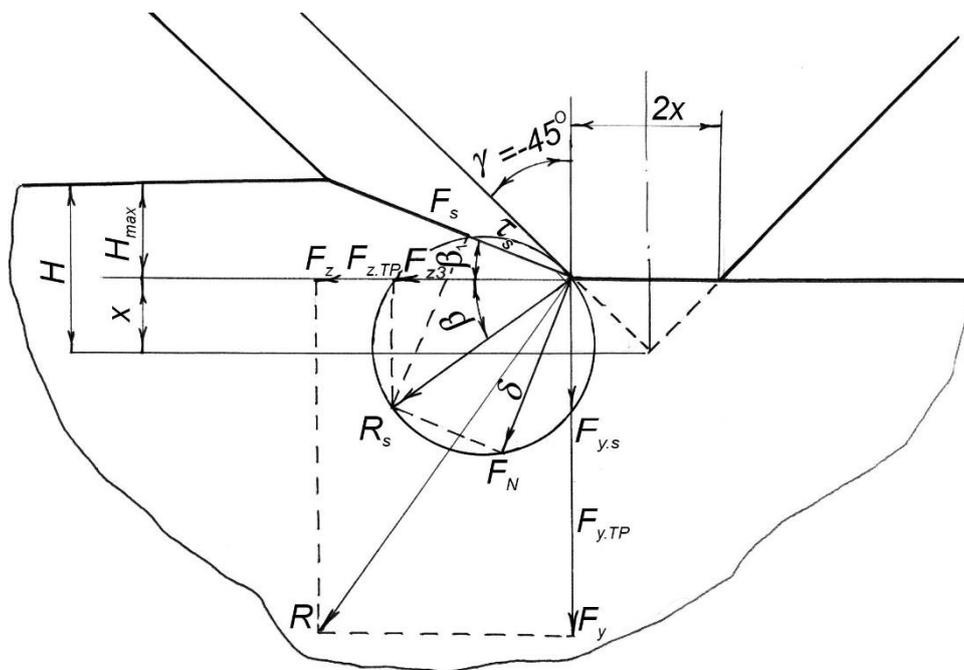


Рис. 5. Силовая расчетная схема резания абразивным зерном

Из силовой расчетной схемы вытекают следующие зависимости:

$$R = \sqrt{F_z^2 + F_y^2}; F_z = F_{z_S} + F_{z_{TP}}; F_y = F_{y_S} + F_{y_{TP}}; R_S = \sqrt{F_S^2 + F_N^2}.$$

В этих зависимостях:

R – сила резания; F_z – тангенциальная составляющая силы резания; F_y – радиальная составляющая силы резания; F_{z_S} – тангенциальная сила от напряжений пластического сдвига; $F_{z_{TP}}$ – тангенциальная сила от трения металла о площадку износа зерна; F_{y_S} – радиальная сила от нормальных напряжений; $F_{y_{TP}}$ – радиальная сила от трения металла о площадку износа зерна; R_S – равнодействующая от сил пластического деформирования срезаемого слоя; F_S – сила сдвига; F_N – нормальная сила; τ_S – касательное напряжение сдвига; σ – нормальное напряжение; $2X$ – величина площади износа зерна.

Схема резания абразивным зерном (рис.5) имеет следующие допущения [8]:

1. Угол при вершине зерна равен 90° . Передний угол $\gamma = -45^\circ$.
2. Угол сдвига β_1 не зависит от толщины среза H_{\max} и примерно равен 22° .
3. При изменении толщины среза H_{\max} пропорционально изменяются силы F_{y_S} и F_{z_S} , а силы $F_{y_{TP}}$ и $F_{z_{TP}}$ остаются постоянными.
4. При изменении площадки затупления зерна $2X$ пропорционально изменяются силы $F_{y_{TP}}$ и $F_{z_{TP}}$, а силы F_{y_S} и F_{z_S} остаются постоянными.

Составляющие силы резания F_y и F_z можно рассчитать по следующим формулам⁵¹

$$F_z = \left(\frac{\sqrt{3,25} \cdot H_{\max} \cdot \cos \beta}{\sin \beta_1} + 0,5 \cdot f \cdot 2X \right) \cdot \tau_S, \quad (1)$$

$$F_y = \left(\frac{\sqrt{3,25} \cdot H_{\max} \cdot \sin \beta}{\sin \beta_1} + 0,5 \cdot f \cdot 2X \right) \cdot \tau_S, \quad (2)$$

где f – коэффициент трения.

Учитывая⁵², что $X = \eta \cdot H$, $H_{\max} = H - X$, получим

$$k_{III} = \frac{F_z}{F_y} = \frac{\sqrt{3,25} \cdot \cos \beta - \sqrt{3,25} \cdot \eta \cdot \cos \beta + f \cdot \eta \cdot \sin \beta_1}{\sqrt{3,25} \cdot \sin \beta - \sqrt{3,25} \cdot \eta \cdot \sin \beta + \eta \cdot \sin \beta_1}. \quad (3)$$

Решая (3) относительно η получим

$$\eta = \frac{k_{III} \cdot \sqrt{3,25} \cdot \sin \beta - \sqrt{3,25} \cdot \cos \beta}{f \cdot \sin \beta_1 - \sqrt{3,25} \cos \beta + k_{III} \cdot \sqrt{3,25} \sin \beta - k_{III} \cdot \sin \beta_1}. \quad (4)$$

После преобразования выражения (4) получим

$$(1 - \eta) = \frac{\sin \beta_1 \cdot (f - k_{III})}{\sin \beta_1 (f - k_{III}) - \sqrt{3,25} \cdot (\cos \beta - k_{III} \cdot \sin \beta)}, \quad (5)$$

$$(1 + \eta) = \frac{\sin \beta_1 \cdot (f - k_{III}) - 2\sqrt{3,25} \cdot (\cos \beta - k_{III} \cdot \sin \beta)}{\sin \beta_1 (f - k_{III}) - \sqrt{3,25} \cdot (\cos \beta - k_{III} \cdot \sin \beta)}. \quad (6)$$

Из работы известно, что $\frac{F_H}{F_S} = \frac{\sigma}{\tau_S} = \operatorname{tg}(\beta_1 + \beta) = 1,5$;

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\cos \beta + 0,05\mu}{0,9 \cdot \mu - \sin \gamma},$$

где μ – усадка стружки ($\mu=1,1 \dots 1,5$); γ – передний угол режущей кромки.

При $\gamma = -45^\circ$; $\beta_1 = 22^\circ$; $\beta_1 + \beta = 56^\circ 18'$ отношение $\frac{(1 - \eta)^2}{(1 + \eta)}$ имеет вид $\frac{(1 - \eta)^2}{(1 + \eta)} =$

⁵¹ Корчак С.И. Обрабатываемость сталей при шлифовании кругами разной характеристики. Вестник машиностроения №6. 1962. С.13-15.

⁵² Новиков Ф.В. Кинематика образования режущего рельефа алмазного круга в процессе шлифования. Контактные процессы при больших пластических деформациях. – Харьков, ХАИ. 1982. –С.37-43.

$$= \frac{0,1403 \cdot (k_{\text{ш}} - f)^2}{[0,3746(k_{\text{ш}} - f) + 1,4893 - k_{\text{ш}} \cdot 1,016] \cdot [0,3746 \cdot (k_{\text{ш}} - f) + 2,9789 - k_{\text{ш}} \cdot 2,2032]} \quad (6)$$

После подстановки (6) в уравнение (7)

$$t = \left[\frac{(3-n) \cdot (6-n) \cdot k_{\text{ш}} \cdot F_y}{1,32 \cdot AB} \right]^{\frac{6}{(6-n)}} \times \left[\frac{66,66 \cdot \pi \cdot \bar{x}^3 (1-\eta)^2 \cdot \sqrt{R}}{\text{tg}\gamma \cdot m \cdot (1+\eta)} \right]^{\frac{2-n}{(6-n)}} \cdot \left[\frac{V_{kp}}{6,9 V_{\text{заг}} \cdot (1+l_2/l_1)} \right]^{\frac{2 \cdot (3-n)}{(6-n)}}, \quad (7)$$

получим

$$t = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{(3-n) \cdot (6-n) \cdot k_{\text{ш}} \cdot F_y}{1,32 \cdot AB} \right]^{\frac{6}{(6-n)}} \cdot \left[\frac{V_{kp}}{6,9 \cdot V_{\text{заг}} \cdot (1+l_2/l_1)} \right]^{\frac{2 \cdot (3-n)}{(6-n)}} \times \left[\frac{29,369 \cdot \bar{x}^3 \cdot \sqrt{R} \cdot (k_{\text{ш}} - f)^2}{\text{tg}\gamma \cdot m \cdot [0,37 \cdot (k_{\text{ш}} - f) + 1,49 - k_{\text{ш}} \cdot 1,016] \cdot [0,37 \cdot (k_{\text{ш}} - f) + 2,98 - k_{\text{ш}} \cdot 2,032]} \right]^{\frac{2n}{(6-n)}}. \quad (8)$$

Полученная зависимость показывает, что глубина резания t зависит не просто от коэффициента шлифования $k_{\text{ш}}$ или коэффициента трения f , а от разности $k_{\text{ш}} - f$. Для установления связи глубины шлифования с силой резания F_z и коэффициентом шлифования $k_{\text{ш}}$ проводились эксперименты. Образцы из стали 12Х2Н4А шириной 3 мм и длиной 150 мм обрабатывались на станке 3Г71М кругом ПП200х20х76 24А40С25К6 врезным шлифованием на режиме: $V_{kp}=30$ м/с, $V_{\text{заг}}=6$ м/мин при постоянной силе прижима образца к кругу $F_y = 60Н$, без СОЖ.

Постоянная сила F_y обеспечивалась с помощью специального приспособления, представляющего собой корпус, внутри которого свободно перемещался ползун с закрепленным образцом. Образец прижимался к кругу рычагом, один конец которого был связан с ползуном, а на другой конец подвешивался груз. Экспериментальные значения коэффициента шлифования $k_{\text{ш}}$, измеренные по мере затупления сплошного и прерывистого кругов, представлены в табл. 3.

Таблица 3

$\tau_{\text{мин}}$	$K_{\text{ш.сп}}$	$K_{\text{ш.пр}}$	$M_{\text{сп}}$	$M_{\text{пр}}$	$M_{\text{пр}}/M_{\text{сп}}$
2	0,35	0,38	0,029432	0,037142	1,262
4	0,32	0,36	0,022680	0,031900	1,406
6	0,28	0,35	0,014370	0,029432	2,048
8	0,27	0,35	0,012519	0,029432	2,351
10	0,25	0,34	0,009031	0,027024	2,992
12	0,25	0,34	0,009031	0,027024	2,992
14	0,22	0,32	0,004102	0,022680	5,529

Параметр M , рассчитанный по формуле

$$M = k_{\text{ш}}^{\frac{6}{6-n}} \left[\frac{(k_n - f)^2}{[0,37(k_{\text{ш}} - f) + 1,49 - k_{\text{ш}} \cdot 1,006] \cdot [0,37 \cdot (k_{\text{ш}} - f) - 2,98 - k_{\text{ш}} \cdot 2,032]} \right]^{\frac{2n}{(6-n)}}$$

для $n = 0,87$ и $f = 0,2$ характеризует режущую способность шлифовального круга в течение времени шлифования

Отношение $M_{\text{пр}}/M_{\text{сп}}$ показывает во сколько раз режущая способность прерывистого круга больше режущей способности сплошного круга. После 14-минутного периода шлифования режущая способность сплошного круга уменьшалась в 5,529 раза.

Экспериментальное значение мощности, затрачиваемой на резание при шлифовании обычным и импрегнированным кругами ПП250х20х76 24A25СМ26К5 стали У8А на режиме $V_{kp} = 35\text{м/с}$; $V_{заг} = 10\text{м/мин}$; $t = 0,02; 0,03; 0,04$ мм приведены в табл. 4.

В качестве импрегнатора применялся состав, содержащий следующие компоненты %:

Стеариновая кислота.....60–65

Олеиновая кислота.....20–25

Ацетамид.....остальное.

Таблица 4

$T, \text{мм}$	Вт		N_u/N_c
	N_{cn}	N_{umh}	
0,02	220	150	0,682
0,03	350	250	0,714
0,04	650	450	0,692

В табл. 5 представлены значения $k_{\text{ш}} - f$ для сплошного, прерывистого и прерывистого импрегнированного кругов и отношение этих разностей.

Таблица 5

$\tau, \text{мин}$	$K_{\text{ш.сп}}$	$K_{\text{ш.п}}$	$K_{\text{ш.сп}} - f$	$K_{\text{ш.п}} - f$	$K_{\text{ш.п}} - f_{\text{и}}$	$\frac{k_{\text{ш.пр}} - f_{\text{и}}}{k_{\text{ш.сп}} - f}$
2	0,35	0,38	0,15	0,18	0,24	1,60
4	0,32	0,36	0,12	0,16	0,22	1,83
6	0,28	0,35	0,08	0,15	0,21	2,62
8	0,27	0,35	0,07	0,15	0,21	3,00
10	0,25	0,34	0,05	0,14	0,20	4,00
12	0,25	0,34	0,05	0,14	0,20	4,00
14	0,22	0,32	0,02	0,12	0,18	9,00

Прерывистые импрегнированные круги после 14-минутного периода шлифования имеет в 9 раз большую режущую способность по сравнению с обычным шлифованием.

На рис. 6,а представлена зависимость режущей способности обычных и прерывистых шлифовальных кругов от радиального усилия F_y .

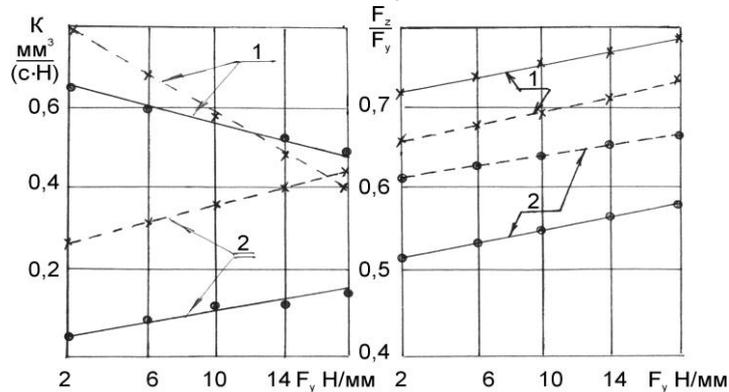


Рис. 6. Зависимость коэффициента режущей способности K и коэффициента шлифования

$$k_{\text{ш}} = F_z / F_y \text{ от радиального условия } F_y$$

Кривая 1 – после правки; кривая 2 – после 10-минутного периода работы.

Сплошные линии – сплошной круг; пунктирные линии – прерывистый круг

После правки режущая способность шлифовальных кругов (кривые 1) в исследуемом диапазоне радиальных усилий F_y от 2 до 18 н/мин уменьшается с $0,65 \text{ мм}^3/(\text{с}\cdot\text{н})$ до $0,50 \text{ мм}^3/(\text{с}\cdot\text{н})$ при обычном шлифовании и с $0,8 \text{ мм}^3/(\text{с}\cdot\text{н})$ до $0,40 \text{ мм}^3/(\text{с}\cdot\text{н})$ при прерывистом шлифовании. После 10-минутного периода шлифования зависимость режущей способности кругов от усилия F_y имеет тенденцию к возрастанию. При шлифовании прерывистым кругом коэффициент k в диапазоне изменения силы F_y от 2 до 18 н/мм увеличился от $0,25 \text{ мм}^3/(\text{с}\cdot\text{н})$ до $0,45 \text{ мм}^3/(\text{с}\cdot\text{н})$, а при шлифовании сплошным кругом от $0,06 \text{ мм}^3/(\text{с}\cdot\text{н})$ до $0,15 \text{ мм}^3/(\text{с}\cdot\text{н})$.

Для объяснения происходящих явлений рассмотрим различия в условиях работы шлифовальных кругов во времени. После правки кругов на рабочей поверхности образуется большое количество разрушенных и слабозакрепленных зерен. Вероятность выкрашивания их из связки зависит от условий шлифования, в частности, от величины радиального усилия F_y . Нами установлено, что с увеличением интенсивности самозатачивания кругов съём металла отстает от роста радиального усилия F_y . При этих условиях режущая способность шлифовальных кругов уменьшается. В последующие периоды шлифования износ кругов замедляется, так как в работу вступают зерна, надёжно удерживаемые связкой. На режущих зернах начинают формироваться площадки износа, круг работает в режиме затупления, режущая способность кругов уменьшается. При прерывистом шлифовании по мере выкрашивания слабо закрепленных зерен на режущих выступах формируются фронтальные зоны. Сила резания распределяется на большее количество режущих зерен и нагрузка, приходящаяся на одно зерно, уменьшается. При этих условиях шлифования при увеличении радиального усилия F_y режущая способность k будет возрастать.

На рис. 6,б представлена зависимость коэффициента шлифования F_z/F_y от величины радиального усилия F_y после правки (кривые 1) и 10-минутного периода шлифования (кривые 2).

Следует отметить, что с увеличением F_y увеличивается глубина внедрения зерен в металл и увеличивается a_z/ρ .

При этих условиях уменьшаются работа, затрачиваемая на удаление металла и увеличивается отношение сил F_z/F_y .

На рис. 7 представлена зависимость коэффициента стабильности процесса шлифования обычным и прерывистым кругом 24A25НСМ26К5 от величины радиального усилия F_y скорости детали V_d и скорости круга V_{kp} .

Коэффициент стабильности

$$\lambda_c = \frac{\ln \frac{k_0}{k}}{\tau},$$

где k_0 – режущая способность шлифовального круга после его правки, $\text{мм}^3/(\text{с}\cdot\text{н})$; k – режущая способность круга после работы его в течение времени τ .

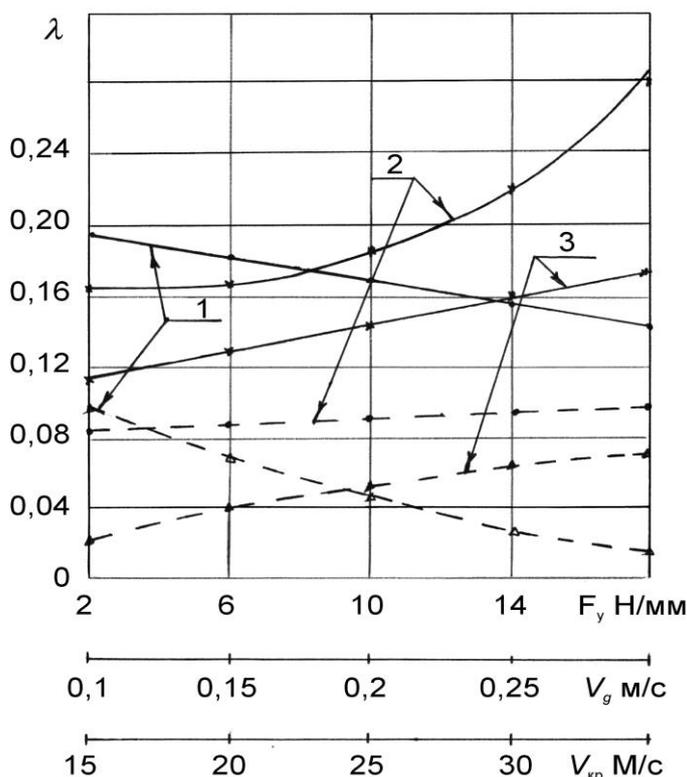


Рис. 7. Зависимость коэффициента стабильности процесса шлифования обычным (сплошные линии) и прерывистым (штриховые линии) кругами от радиального усилия F_y (кривые 1) от скорости продольной подачи (кривые 2) и скорости круга (кривые 3)

Следует обратить внимание, что при шлифовании стали 18ХНВА на режиме $V_{kp} = 34,5$ м/с, $V_d = 0,1$ м/с, $S_n = 0$ с увеличением радиального усилия от 2 до 18 н/мм коэффициент стабилизации уменьшается, т. е. процесс шлифования становится более стабильным с точки зрения производительности. Процесс прерывистого шлифования протекает в более стабильных условиях.

Повышение стабильности процесса шлифования прерывистыми кругами объясняется наличием на режущих выступах фронтальных поверхностей, условия работы которых стабилизируются равномерным самозатачиванием по всему профилю режущего выступа с сохранением оптимального угла атаки к плоскости резания.

Оптимальный угол атаки поддерживается автоматически самим процессом. Автоматическое саморегулирование угла атаки, обеспечивает стабилизацию процесса шлифования с позиции максимальной производительности, минимального износа и оптимальной теплонапряженности.

References:

1. Narasimha, M. Improving cutting Tool Life a Review / M. Narasimha, K. Sridhar, et al. // International Journal of Engineering Research and Development. – 2013. – Vol. 7. – Iss.1. – P. 67-75.

2. Handbook of Machining with Grinding Wheels, Second Edition / Ioan D. Marinescu, Mike P. Hitchiner. CRC Press. – 2016. – 750 p.

3. Kito, Y., Katsuma, T., Yanase, Y., Nose, Y. (2015). Latest Technologies for High-Precision, High-Efficiency Gear Grinding Processing. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 52 (3), 5-8

4. Yi, J., Jin, T., Deng, Z. (2019). The temperature field study on the three-dimensional surface moving heat source model in involute gear form grinding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 103 (5-8), 3097-3108. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03752-9>

5. Firas M. F. Al Quran, F. M. F. A. Q. (2018). Theoretical Corroboration of the Selection Criteria of the Breaking-in and Shape-Copy Gear Teeth Grinding Methods. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, 8 (1), 389-392. doi: <https://doi.org/10.24247/ijmperdfeb201842>

6. Jin, T., Yi, J., Li, P. (2016). Temperature distributions in form grinding of involute gears. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 88 (9-12), 2609-2620. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8971-z>

7. Mohammad Essa Matarneh, M. E. M. (2018). Improvement of Abrasive and Edge Cutting Machining Efficiency through Theoretical Analysis of Physical Conditions, International Journal of Machining and Production Engineering Research and Development, 8 (2), 249-262. doi: <https://doi.org/10.24247/ijimperdapr201828>

8. Patil, R. A., Gombi, S. L. (2018). Experimental study of cutting force on a cutting tool during machining using inverse problem analysis. Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 40 (10). doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1411-2>

9. Корчак С.И. Обрабатываемость сталей при шлифовании кругами разной характеристики. Вестник машиностроения №6. 1962. С. 13-15.

10. Новиков Ф.В. Кинематика образования режущего рельефа алмазного круга в процессе шлифования. Контактные процессы при больших пластических деформациях. – Харьков, ХАИ. 1982. – С. 37-43.