

УДК 621.922.3

Н. А. Старовойтов

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПОДДЕРЖАНИЯ ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ
НА АБРАЗИВНО-ОТРЕЗНЫХ СТАНКАХ С КАЧАЮЩЕЙСЯ
ШПИНДЕЛЬНОЙ БАБКОЙ**

UDC 621.922.3

N. A. Starovoitov

**EXPERIMENTAL STUDIES OF THE EFFICIENCY OF MAINTAINING
CONSTANT CUTTING SPEED ON ABRASIVE CUT-OFF MACHINES WITH
A ROTATING SPINDLE ASSEMBLY**

Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований повышения эффективности абразивно-отрезных станков с качающейся шпиндельной бабкой с поддержанием постоянной скорости резания при разрезании заготовок круглого профиля. Установлено, что поддержание постоянной скорости резания при износе абразивно-отрезного круга и применение привода с передаточным отношением между шпинделем и ротором электродвигателя 1:1 приводят к повышению коэффициента шлифования в среднем в 1,25...1,35 раза по сравнению со станком с исходными конструктивными параметрами.

Ключевые слова:

абразивно-отрезной круг, коэффициент шлифования, виброперемещение.

Abstract

The paper presents the results of experimental studies of improving the efficiency of abrasive cut-off machines with a rotating spindle assembly maintaining a constant cutting speed when cutting-off workpieces of round profile. It was found that maintaining a constant cutting speed during the wear of an abrasive cut-off wheel and using the drive with a 1:1 gear ratio between the spindle and the electric motor's rotor results in a 1,25...1,35-fold increase of the grinding coefficient compared to the machine with the original design parameters.

Keywords:

abrasive cut-off wheel, G-ratio, vibration displacement.

Введение

При разрезании заготовок абразивно-отрезные круги с постоянной частотой вращения интенсивно изнашиваются, в связи с этим происходит уменьшение скорости резания. Уменьшение скорости резания при постоянной величине подачи приводит к уменьшению коэффициента шлифования G , равного отношению площади разрезаемого сечения заготовки S_z

к площади изношенной части круга S_u , что значительно увеличивает издержки процесса резания [1–3]. Коэффициент G зависит от величины подачи круга, при этом величина подачи круга v_{no} считается оптимальной, при ней коэффициент G будет максимальным [3].

$$G = \frac{S_z}{S_u}. \quad (1)$$



В [4, 5] приведены результаты отрицательного влияния различных частот виброперемещения на износ круга, отличающихся от частоты вращения круга. В частности, установлено, что наличие частоты виброперемещения круга 50 Гц, вызываемой дисбалансом ротора электродвигателя главного привода, не равной частоте вращения круга 65 Гц, увеличивает износ круга в абразивно-отрезном станке мод. 8В242 в среднем в 1,3...1,4 раза.

По данным, приведенным в [1], поддержание постоянной скорости резания при износе круга приводит к увеличению коэффициента шлифования в 1,1...1,2 раза, что может значительно повысить эффективность процесса резания.

В [3] установлено, что с уменьшением длины дуги контакта при одной и той же подаче коэффициент шлифования увеличивается. Можно предположить, что с уменьшением длины дуги контакта оптимальная подача будет также увеличиваться.

При разрезании круглых заготовок оптимальная подача круга выбирается для максимальной дуги контакта и всегда будет меньше оптимальной подачи для меньших длин дуг контакта при врезании круга и на выходе круга из заготовки, что снижает эффективность процесса резания.

Можно предположить, что увеличение скорости подачи круга на входе и выходе круга из круглой заготовки может привести к уменьшению виброскорости круга из-за увеличения демпфирования силами резания и некоторому уменьшению износа круга, а также к повышению производительности. Это предположение требует экспериментальной проверки.

Исследования проводились в лаборатории СКБ ОЦ ОАО «СтанкоГомель».

Целью работы является экспериментальное исследование конструктивных решений по модернизации абразивно-отрезного станка мод. 8В242

с учетом приведенных рекомендаций, направленных на повышение эффективности процесса резания.

Постановка задачи и методика исследования

Экспериментальная проверка эффективности конструктивных решений и рекомендаций, направленных на уменьшение износа абразивно-отрезных кругов и повышения производительности процесса резания, производилась на абразивно-отрезном станке мод. 8В242, в конструкцию которого были внесены следующие изменения (рис. 1).

Станок мод. 8В242 до модернизации имел нерегулируемый главный привод мощностью 30 кВт с частотой вращения электродвигателя 3000 об/мин (50 с^{-1}) и частотой вращения шпинделя 3820 об/мин (64 с^{-1}). Необходимая частота вращения шпинделя достигалась за счет применения зубчатых шкивов, установленных на валу электродвигателя и шпинделе с соотношением зубьев 34/26 соответственно, что соответствовало начальной скорости резания 80 м/с кругом диаметром 400 мм. Момент с вала электродвигателя на вал шпинделя передавался с помощью плоскозубчатого ремня.

На первом этапе была проведена следующая модернизация.

Для поддержания постоянной скорости резания 80 м/с при износе круга 1 был установлен частотный преобразователь ЭКТ-63/380-У4 для увеличения частоты вращения круга электродвигателем 6 главного привода. В станке дополнительно был установлен на станине фотоимпульсный датчик энкодер 11 мод. А58-F-5000-5в, на валу которого закреплена шестерня 12. Шестерня 12 датчика 11 находится в зацеплении с шестерней 10, неподвижно закрепленной на корпусе шпиндельной бабки 3. Момент с вала электродвигателя 6 через зубчатый шкив 5 передается на шкив

шпинделя 2 через плоскозубчатый ремень 4. На валу ротора электродвигателя 6 для измерения его частоты вращения был установлен фотоимпульсный

датчик энкодэр 13 мод. А58-F-500-5в. Также на порядок до $1,5 \cdot 10^8$ Н/м была ужесточена нижняя опора гидроцилиндра 9.

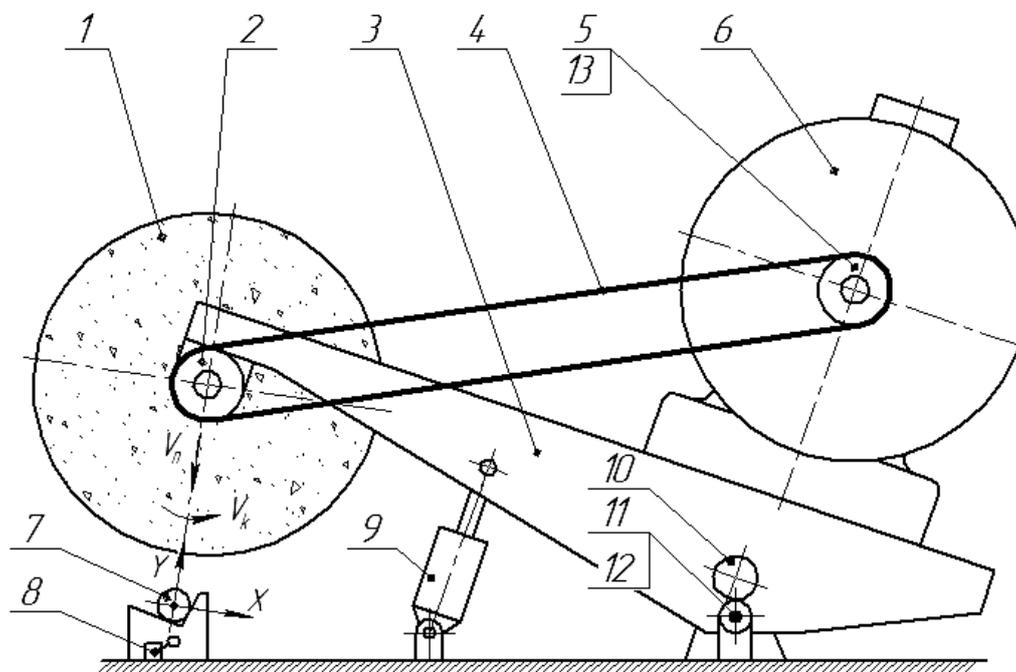


Рис. 1. Схема конструкции абразивно-отрезного станка мод. 8B242

Подача круга 1 при разрезании заготовки 7 осуществлялась с помощью гидроцилиндра 9 до касания кромкой круга датчика реверса подачи 8. При срабатывании датчика реверса подачи 8 считывался цифровой сигнал с датчика 11 и преобразовывался цифровым аналоговым преобразователем (ЦАП) в аналоговый сигнал задания на увеличение частоты вращения ротора электродвигателя 6 и определения значения величины подачи v_n . Во время отвода круга 1 увеличивалась частота вращения пропорционально его износу, что обеспечивало поддержание начальной скорости резания, равной 80 м/с. Цифровой сигнал с датчика 13 с помощью АЦП преобразовывался в аналоговое значение частоты вращения ротора электродвигателя 6.

Для чистоты эксперимента все заготовки из стали 45 ГОСТ 1050–2013 раз-

резались абразивно-отрезными кругами марки 41-400x4x32 14А 80-Н 41-43ВФ ГОСТ 21963–2002. Виброперемещение a_k шпинделя с кругом измерялось на корпусе шпинделя в непосредственной близости от круга с помощью виброизмерительной многоканальной аппаратуры ВМ-1 с индуктивными датчиками МВ-27. Величина подачи v_n , частота вращения круга f_k и время резания t_p отображались с помощью многоканального устройства цифровой индикации СS-300 с АЦП и процессором. Для определения численного значения виброперемещения a_k использовался анализатор осциллограмм, построенный на базе компьютерного комплекса. Анализатор включает в себя многоканальные устройства преобразования цифрового сигнала в аналоговый (ЦАП) с дальнейшим частотным анализом с помощью программы Visual Analyzer 1.3, работающей в среде Windows.

Начальный $D_{кн}$ и конечный $D_{кк}$ диаметры круга при его износе измерялись штангенциркулем с цифровой индикацией с разрешением 0,01 мм. Площадь износа S_u круга вычислялась по формуле

$$S_u = \pi(D_{кн}^2 / 4 - D_{кк}^2 / 4). \quad (2)$$

При постоянной частоте вращения круга n_k средняя скорость резания V_k круга рассчитывалась по формуле

$$V_k = [\pi(D_{кн} + D_{кк}) / 2]n_k. \quad (3)$$

Для определения оптимальной подачи v_{no} и соответствующего ей коэффициента шлифования G (рис. 2) разрезались заготовки диаметрами 20, 40 и 60 мм с начальной скоростью резания 80 м/с, с постоянной частотой вращения круга, равной 64 с^{-1} . Разрезание заготовок производилось на станке до модернизации. На валу электродвигателя главного привода и шпинделе

были установлены шкивы с соотношением зубьев 34/26 соответственно. Чтобы избежать влияния уменьшения скорости резания при износе круга, разрезание проводилось новым кругом диаметром 400 мм, не более 3...4 резов.

Установлено (см. рис. 2), что для заготовки диаметром $b_3 = 0,02 \text{ м}$ соответствует $v_{no} = 0,067 \text{ м/с}$, при которой максимальный $G = 1,92$, диаметром $b_3 = 0,04 \text{ м}$ – $v_{no} = 0,022 \text{ м/с}$, при которой максимальный $G = 1,59$, диаметром $b_3 = 0,06 \text{ м}$ – $v_{no} = 0,0136 \text{ м/с}$, при которой максимальный $G = 1,38$.

Для определения зависимости коэффициента шлифования G (рис. 3), от уменьшения скорости резания V_k за счет износа круга при постоянной частоте вращения круга 64 с^{-1} и ротора электродвигателя 50 с^{-1} производилось разрезание заготовок 0,02; 0,04 и 0,06 м с оптимальной подачей до полного износа круга. На валу электродвигателя главного привода и шпинделе были установлены шкивы с соотношением зубьев 34/26 соответственно.

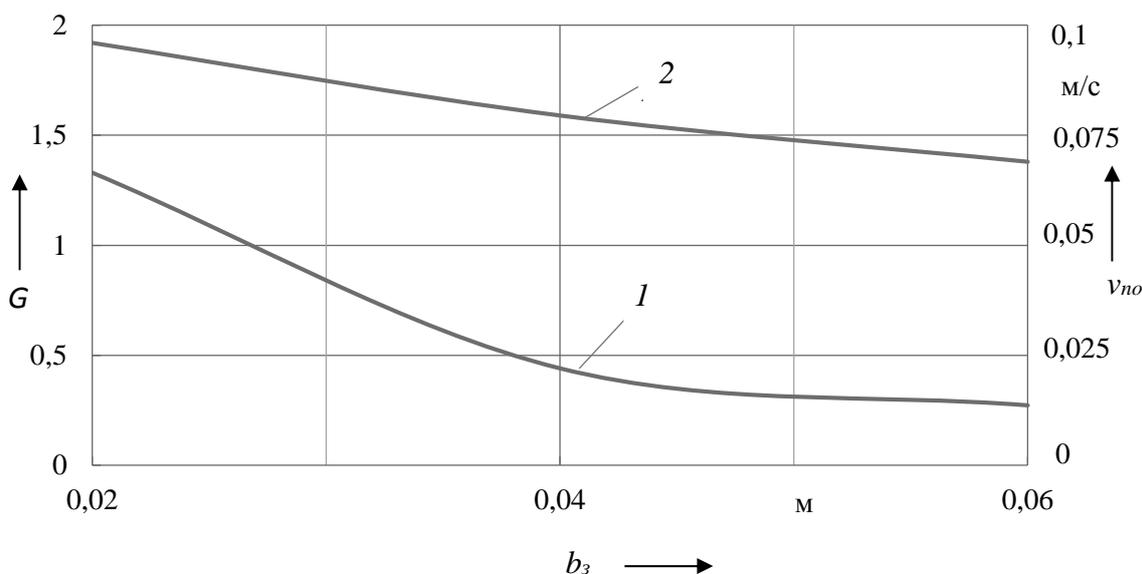


Рис. 2. Зависимость оптимальной подачи v_{no} (1) и коэффициента шлифования G (2) от диаметра разрезаемой заготовки b_3



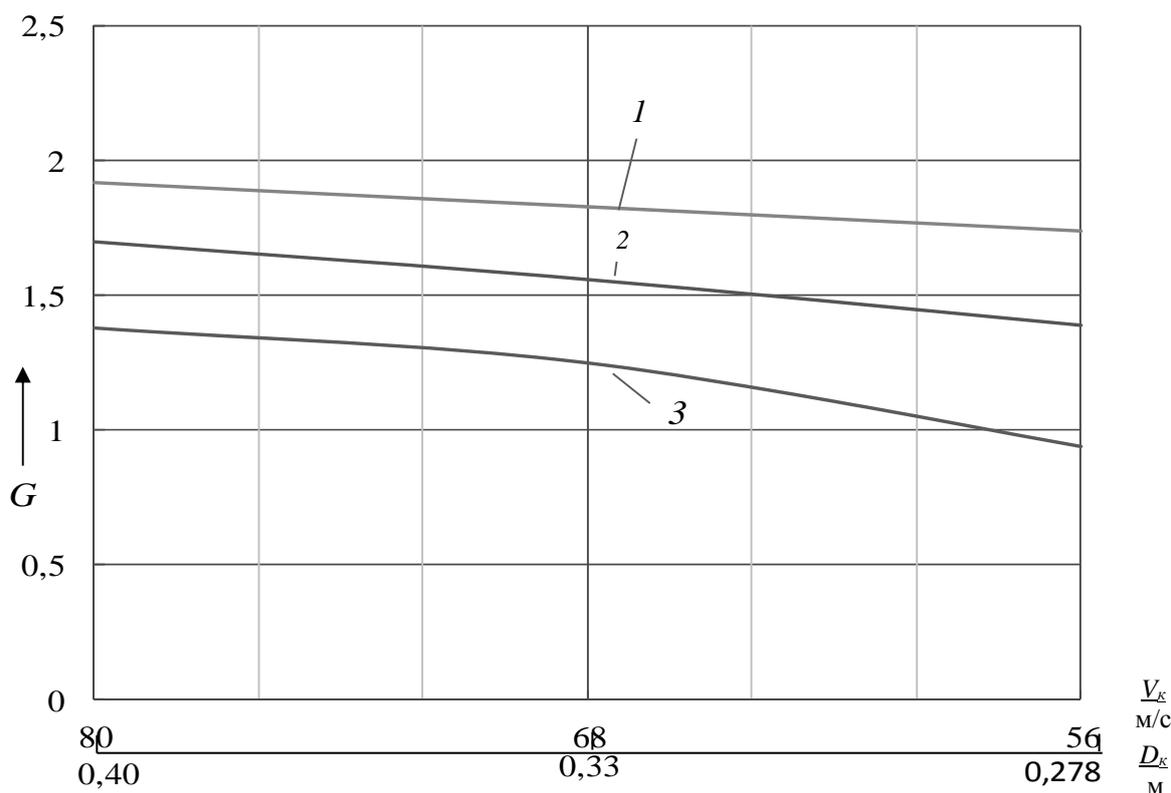


Рис. 3. Зависимость коэффициента шлифования G от скорости резания V_k при износе круга D_k : 1 – при резании заготовки диаметром 0,02 м с подачей $v_n = 0,067$ м/с; 2 – при резании заготовки диаметром 0,04 м с подачей $v_n = 0,022$ м/с; 3 – при резании заготовки диаметром 0,06 м с подачей $v_n = 0,0136$ м/с

На основании рис. 3 можно сделать следующие выводы.

При износе круга и вследствие этого уменьшении скорости резания до $V_k = 56$ м/с при резании заготовки диаметром 0,02 м коэффициент шлифования G уменьшается в 1,1 раза, при резании заготовки диаметром 0,04 м – в 1,22 раза, при резании заготовки диаметром 0,06 м – в 1,47 раза.

При резании заготовок диаметром 0,02 м средний коэффициент шлифования $G = 1,83$, диаметром 0,04 м – $G = 1,39$, диаметром 0,06 м – $G = 1,19$.

Для определения зависимости коэффициента шлифования G (рис. 4) от диаметра резаемой заготовки b_3 при постоянной скорости резания $V_k = 80$ м/с, поддерживаемой за счет увеличения частоты вращения круга при его износе, производилось резание заготовок

диаметрами 0,02, 0,04 и 0,06 м до полного износа круга. При резании заготовок для каждого диаметра выбиралась оптимальная подача. На валу электродвигателя главного привода и шпинделе были установлены шкивы с соотношением зубьев 34/26 соответственно.

На основании рис. 4 можно сделать следующие выводы.

При поддержании постоянной скорости резания $V_k = 80$ м/с за счет увеличения частоты вращения круга f_k при его износе при резании заготовки диаметром 0,02 м коэффициент шлифования в среднем $G = 1,96$, при резании заготовки диаметром 0,04 м – $G = 1,59$, при резании заготовки диаметром 0,06 м – $G = 1,38$. Коэффициент шлифования изменялся в пределах 1 % во всем диапазоне частот вращения круга.



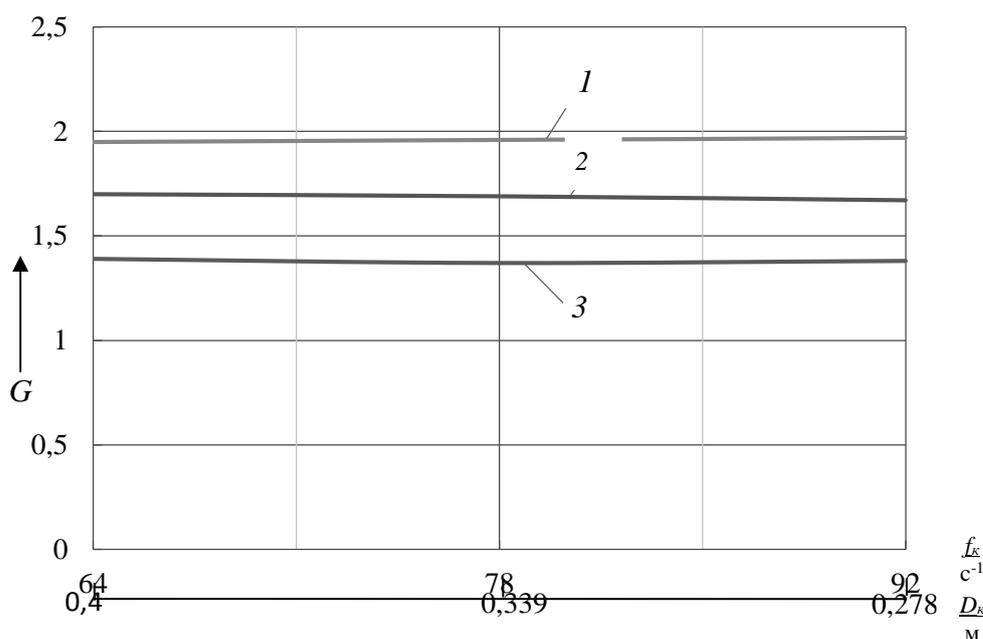


Рис. 4. Зависимость коэффициента шлифования G от частоты вращения круга f_k диаметром D_k при постоянной скорости резания $V_k = 80$ м/с: 1 – при разрезании заготовки диаметром 0,02 м с подачей $v_n = 0,067$ м/с; 2 – при разрезании заготовки диаметром 0,04 м с подачей $v_n = 0,022$ м/с; 3 – при разрезании заготовки диаметром 0,06 м с подачей $v_n = 0,0136$ м/с

Сравнивая результаты резания без поддержания постоянной скорости резания (см. рис. 3) с результатами резания с поддержанием постоянной скорости резания (см. рис. 4), можно сделать выводы, что поддержание постоянной скорости резания V_k при разрезании заготовок диаметром 0,02 м увеличивает коэффициент шлифования G в 1,07 раза, диаметром 0,04 м – в 1,1 раза, диаметром 0,06 м – в 1,16 раза.

Необходимо отметить, что значительное повышение коэффициента шлифования G при поддержании постоянной скорости резания V_k , вероятно, связано с возрастанием влияния амплитуды колебаний, вызванной дисбалансом ротора электродвигателя главного привода на частоте, отличающейся от частоты вращения круга [4].

Для определения зависимости ко-

эффициента шлифования G (рис. 5) от частоты вращения круга f_k диаметром D_k при постоянной скорости резания $V_k = 80$ м/с, поддерживаемой за счет увеличения частоты вращения круга f_k при его износе, производилось разрезание заготовок диаметром 0,02; 0,04 и 0,06 м до полного износа круга. При разрезании заготовок для каждого диаметра соответственно выбиралась оптимальная подача: $v_n = 0,067$ м/с, $v_n = 0,022$ м/с, $v_n = 0,0136$ м/с. Для исключения частоты колебаний ротора 50 Гц, возбуждаемой дисбалансом ротора электродвигателя, на валу электродвигателя был установлен шкив с числом зубьев 21, равным числу зубьев шкива шпинделя. Начальная частота шпинделя и ротора электродвигателя была равна 64 с $^{-1}$, что соответствовало постоянной скорости резания 80 м/с.

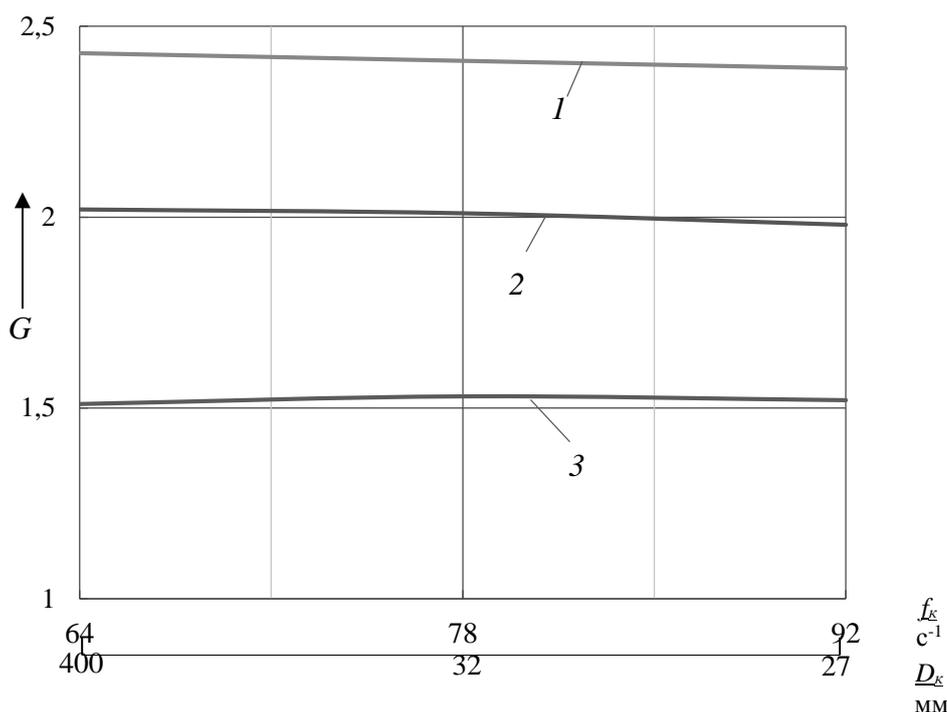


Рис. 5. Зависимость коэффициента шлифования G от частоты вращения f_k круга диаметром D_k при постоянной скорости резания $V_k = 80$ м/с: 1 – при разрезании заготовки диаметром 0,02 м с подачей $v_n = 0,067$ м/с; 2 – при разрезании заготовки диаметром 0,04 м с подачей $v_n = 0,022$ м/с; 3 – при разрезании заготовки диаметром 0,06 м с подачей $v_n = 0,0136$ м/с

На основании рис. 5 можно сделать следующие выводы.

При поддержании постоянной скорости резания 80 м/с при износе круга и одинаковой начальной частоте вращения круга и ротора электродвигателя главного привода, равной 64 с⁻¹, коэффициент шлифования G при разрезании заготовки диаметром 0,02 м увеличивается в 1,23 раза, при разрезании заготовки диаметром 0,04 м – в 1,18 раза, при разрезании заготовки диаметром 0,06 м – в 1,11 раза.

Для проверки влияния величины амплитуды виброперемещения круга a_k (рис. 6) на износ круга при частоте 64 Гц, равной частоте вращения круга, и частоте 50 Гц, равной частоте вращения электродвигателя, разрезались заготовки диаметром 0,06 м из стали 45 ГОСТ 1050–2013 кругами марки 41-400x4x32 14А 80-Н 41-43ВФ ГОСТ 21963–2002 с постоянной скоростью резания $V_k = 80$ м/с, подачей кру-

га $v_n = 0,0136$ м/с, без охлаждения. Для измерения амплитуды виброперемещения в точке на шпинделе вблизи круга использовалась виброизмерительная многоканальная аппаратура ВМ-1 с индуктивными датчиками МВ-27.

Чтобы избежать влияния дисбаланса и увеличения частоты вращения круга при его износе, круг при резании изнашивался незначительно, в пределах 400...398 мм. Для изменения амплитуды виброперемещения использовался вибратор в виде электродвигателя постоянного тока с регулируемой частотой вращения, установленный на корпусе шпинделя. Изменение амплитуды виброперемещения достигалось за счет дисбалансных грузов, закрепленных на валу ротора электродвигателя.

Сначала разрезались заготовки без дисбаланса. В результате измерения было установлено, что виброперемещение a_k на частоте вращения круга 64 с⁻¹



без дисбаланса равно в среднем $8 \cdot 10^{-6}$. Затем с помощью дисбалансных грузов амплитуда увеличивалась в 2; 3 и 4 раза, при этом возмущающая частота vibra-

тора 64 Гц была равна частоте вращения круга 64 с^{-1} . Далее проводилась такая же серия экспериментов при возмущающей частоте вибратора, равной 50 Гц.

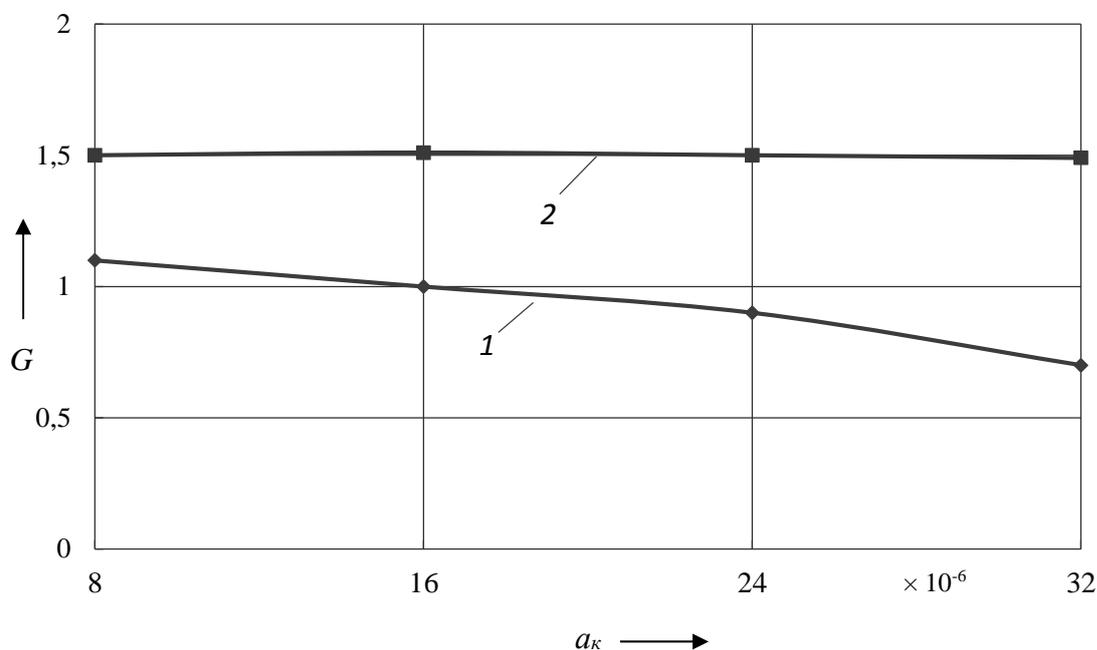


Рис. 6. Зависимости коэффициента шлифования G от амплитуды колебаний круга a_k на частотах 50 Гц (1) и 64 Гц (2), при разрезании заготовки диаметром 0,06 м с постоянной скоростью резания 80 м/с, подачи круга $v_n = 0,0136$ м/с, без охлаждения

На основании рис. 6 можно сделать следующие выводы.

При увеличении амплитуды виброперемещения круга a_k с частотой колебаний 64 Гц, равной частоте вращения круга 64 с^{-1} , коэффициент шлифования G изменяется в пределах 1 %.

При увеличении амплитуды виброперемещения a_k с частотой колебаний 50 Гц, не равной частоте вращения круга 64 с^{-1} , коэффициент шлифования уменьшался почти линейно с увеличением амплитуды виброперемещения. При увеличении амплитуды виброперемещения a_k в 2 раза коэффициент шлифования уменьшался в среднем на 9 %.

Заключение

1. Применение в абразивно-отрезных станках регулируемого глав-

ного привода с передаточным отношением 1 : 1 между ротором электродвигателя и шпинделем для поддержания постоянной скорости резания 80 м/с приводит к уменьшению износа круга в среднем $1,25 \dots 1,35$ раза.

2. При увеличении амплитуды виброперемещения круга с частотой колебаний 64 Гц, равной частоте вращения круга 64 с^{-1} , коэффициент шлифования G практически не изменяется. В связи с этим можно сделать вывод, что балансирование абразивно-отрезных кругов с точки зрения уменьшения их износа нецелесообразно.

3. При увеличении амплитуды виброперемещения с частотой колебаний 50 Гц, не равной частоте вращения круга 64 с^{-1} , коэффициент шлифования уменьшался почти линейно с увеличением амплитуды виброперемещения.



При увеличении амплитуды виброперемещения в 2 раза коэффициент шлифования уменьшался в среднем на 9 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Геллетсбергер, Х.** Горячее отрезание шлифовальным кругом на сталепрокатных заводах. Современный технический уровень, тенденции / Х. Геллетсбергер // Современная техника Австрии: тез. докл. – Москва: Красная Пресня, 1981. – С. 8–12.
2. **Старовойтов, Н. А.** Исследование износа абразивно-отрезных кругов и виброскорости их колебаний при различных режимах резания / Н. А. Старовойтов, Е. Н. Демиденко, С. И. Красюк // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 1 (58). – С. 61–68.
3. **Старовойтов, Н. А.** Анализ путей повышения эффективности абразивно-отрезных станков с качающейся шпиндельной бабкой / Н. А. Старовойтов, С. В. Рогов // Современные проблемы машиноведения: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 68–69.
4. **Старовойтов, Н. А.** Математическое моделирование процесса износа абразивно-отрезных кругов при гармонических колебаниях / Н. А. Старовойтов // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2015. – Т. 20, № 2. – С. 41–45.
5. **Старовойтов, Н. А.** Идентификация математической модели износа абразивно-отрезного круга / Н. А. Старовойтов, С. В. Рогов // Современные проблемы машиноведения: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – С. 72–73.
6. **Балакшин, Б. С.** Адаптивное управление станками / Б. С. Балакшин. – Москва: Машиностроение, 1973. – 688 с.
7. **Володько, Г. Ф.** Выбор мощности привода абразивно-отрезных станков / Г. Ф. Володько, Н. Н. Платонов // Станки и инструмент. – 1979. – № 2. – С. 17–18.

Статья сдана в редакцию 20 июня 2019 года

Николай Андреевич Старовойтов, канд. техн. наук, доц., Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого.

Nikolai Andreyevich Starovoitov, PhD (Engineering), Associate Prof., Pavel Sukhoi State Technical University of Gomel.