

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АБРАЗИВНО-ОТРЕЗНЫХ СТАНКОВ ЗА СЧЕТ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ

Н. А. Старовойтов<sup>1</sup>, С. В. Рогов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> К. т. н., доцент кафедры «Технология машиностроения» Гомельского государственного технического университета, Гомель, Беларусь, e-mail: starnik49@mail.ru

<sup>2</sup> Ассистент кафедры «Технология машиностроения» Гомельского государственного технического университета, Гомель, Беларусь, e-mail: starnik49@mail.ru

### Реферат

В статье приведены ссылки на источники, в которых указывается, что при разрезании заготовок из сталей абразивно-отрезными кругами, существует оптимальная подача, при которой износ круга будет минимальный. Также из проведенных исследований авторами установлено, что стоимость круга в стоимости однокрема достигает до 71%. Снижение износа круга при использовании оптимальной подачи приводит к повышению эффективности процесса резания. Поиск оптимальной подачи в ручном режиме весьма трудоёмкий и неэффективный в связи с тем, что зависит от многих факторов: подачи круга, материала и диаметра и разрезаемой заготовки скорости резания марки круга.

На практике используется процесс резания с контролем по мощности, исходя из максимальной загрузки электродвигателя главного привода за счет изменения подачи круга, что не всегда соответствует ее оптимальному значению.

В статье предложена конструкция абразивно-отрезного станка, позволяющая с помощью процессорного устройства в автоматизированном режиме, осуществлять пошаговый поиск оптимальной подачи, соответствующей максимальной эффективности и максимальной производительности процесса резания, определять стоимость реза в рублевом эквиваленте.

**Ключевые слова:** абразивно-отрезной круг, коэффициент шлифования, оптимальные режимы резания.

### INCREASED EFFICIENCY OF USING ABRASIVE-CUTTING MACHINES DUE TO AUTOMATED SEARCH OF OPTIC-SMALL CUTTING MODES

N. A. Starovaitov, S. V. Rogov

### Abstract

The results of experimental studies of increasing the efficiency of abrasive-cutting machine with a swinging headstock with maintaining a constant cutting speed when cutting steel workpieces due to automated search for optimal cutting conditions are presented.

It is established that the optimal feed corresponding to the maximum efficiency and the feed corresponding to the maximum productivity can not fall in value, which is established in the conducted experimental studies.

The design of the abrasive-cutting machine is proposed, which allows using the processor device in an automated mode, to carry out a step-by-step search for the optimal feed corresponding to the maximum efficiency and maximum productivity of the cutting process.

**Keywords:** abrasive-cutting wheel, grinding coefficient, optimal cutting conditions.

### Введение

При разрезании заготовок абразивно-отрезными кругами коэффициент шлифования  $G$ , равный отношению площади разрезаемого сечения заготовки  $S_z$  к площади изношенной части круга  $S_{\text{ш}}$ , зависит от многих факторов: подачи круга  $V_n$ , материала и диаметра разрезаемой заготовки  $d_3$ , скорости резания  $V_k$ , марки круга [1, 2, 3]. Для станков с поддержанием постоянной скорости резания  $V_k$  основным переменным параметром является подача круга  $V_n$ , от которой зависит коэффициент шлифования  $G$  [4].

Несмотря на высокую производительность и относительно невысокую стоимость одного реза, на абразивно-отрезных станках с кругом диаметром 0,4 м, затраты на режущий инструмент в среднем достигают до 71% от стоимости одного реза, в то время, как при разрезании заготовок, например, на ленточно-отрезных станках, эти затраты они не превышают 5% [5].

Коэффициент шлифования  $G$  имеет один максимум, при подаче, которая считается оптимальной и обеспечивает максимальную эффективность процесса резания, что соответствует минимальной стоимости одного реза [1, 2].

При экспериментальных исследованиях поиск оптимальной подачи осуществлялся в ручном режиме путем замеров износа круга при различных значениях величины подачи. Этот процесс весьма трудоёмкий и неприменим на практике. На практике используется процесс резания с контролем по мощности исходя из максимальной загрузки электродвигателя главного привода за счет изменения подачи круга, что не всегда соответствует ее оптимальному значению [6].

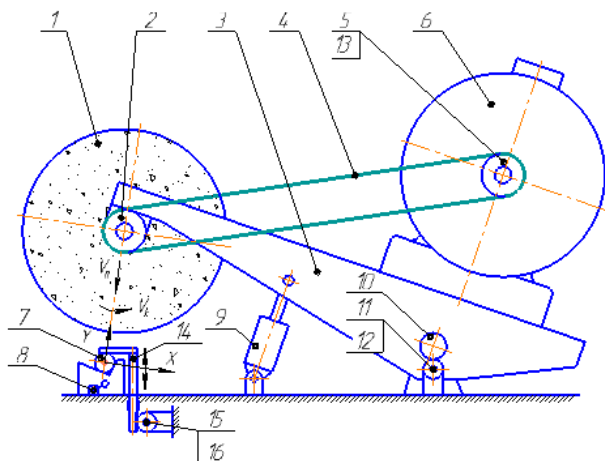
Одним из путей повышения эффективности абразивно-отрезных станков является автоматизированный поиск оптимальной подачи, при которой коэффициент шлифования  $G$  будет максимальным, а стоимость одного реза – минимальной.

Целью данной работы является повышение эффективности процесса резания абразивно-отрезных станков за счет автоматизированного поиска оптимальной подачи, обеспечивающей минимальные затраты на один рез.

### Постановка задачи, методика исследования

Экспериментальная проверка повышения эффективности процесса резания абразивно-отрезных станков за счет автоматизированного поиска оптимальной подачи, обеспечивающей минимальные затраты на один рез, производилась на абразивно-отрезном станке-стенде мод. 8В242, в конструкцию которого были внесены ниже следующие изменения (рис. 1). Исследования проводились в лаборатории СКБ ОЦ ОАО «СтанкоГомель».

Станок мод. 8В242 до модернизации имел нерегулируемый главный привод мощностью 30кВт с частотой вращения электродвигателя 3000 об/мин. (50 с<sup>-1</sup>) [4]. Частота вращения шпинделя была постоянной и равна 3820 об/мин. (64 с<sup>-1</sup>). 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 0,4 м. Момент с вала электродвигателя на вал шпинделя передавался с помощью плоскозубчатого ремня.



**Рисунок 1** – Принципиальная схема конструкции абразивно-отрезного модернизированного станка-стенда мод.8В242

При модернизации станка для поддержания постоянной скорости резания при износе круга 1 был установлен частотный преобразователь ЭКТ-63/380-У4 для сохранения постоянной скорости резания 80 м/с с передаточным отношением между шкивами шпинделя и электродвигателя равным 1:1. На станке дополнительно установлен на станине фотоимпульсный датчик-энкодер 11 мод. А58-F-5000-5в, на валу которого закреплена шестерня 12. Шестерня датчика 12 находится в зацеплении с шестерней 10, неподвижно закрепленной на оси качения 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, установлен фотоимпульсный датчик-энкодер 13 мод. А58-F-500-5в. Также, на порядок, до  $1,5 \cdot 10^8$  Н/м была ужесточена нижняя опора гидроцилиндра 9. Диаметр заготовки определяет прихват-зубчатая рейка 14, которая находится в зацеплении с шестерней 15, закрепленной на валу энкодера 16 мод. А58-F-500-5в.

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 с помощью цифрового аналогового преобразователя (ЦАП) в аналоговые сигналы задания на увеличение частоты вращения ротора электродвигателя 6, а также на вычисление аналогового значения величины подачи и диаметра круга. Во время отвода круга 1 увеличивалась его частота вращения пропорционально износу, что обеспечивало поддержание начальной скорости резания, равной 80 м/с. Цифровой сигнал с датчика 13 с помощью ЦАП преобразовывался в аналоговое значение частоты вращения ротора электродвигателя 6. При зажиме заготовки прихватом-рейкой 14 вращался вал 15 энкодера 16. По цифровому сигналу, считываемому с энкодера 16, определялся диаметр разрезаемой заготовки и пересчитывался соответственно в площадь её сечения.

Вся необходимая информация от датчиков для определения площади сечения разрезаемой заготовки  $S_z$  площади износа круга  $S_u$  в пределах одного реза передавалась на интерфейс многоканального программируемого устройства ЛИР581 с возможностью подключения до шести датчиков цифровой информации типа энкодер.

ЛИР581 позволяет поддерживать с помощью процессора постоянную скорость резания при износе круга, определять коэффициент шлифования  $G$  и затраты на инструмент  $Z_u$  на один рез при разрезании заготовок различного сечения в рублях, если стоимость круга  $Z_k$  и прочие затраты  $Z_n$  были внесены в исходные данные при программировании, и выводит информацию на цифровое табло.

Для задания необходимой величины подачи применялся электрогидравлический регулятор потока с электромагнитным пропорциональным управлением мод. РП10, позволяющий управлять подачей круга в ручном и автоматическом режиме от ЛИР581.

Исходя из поставленной цели, в основу выбора рациональных конструктивных параметров и основных технических характеристик абразивно-отрезных станков с качающейся шпиндельной бабкой и регулируемым главным приводом положен критерий достижения минимальных приведенных затрат на один рез, определяющее значение в которых играют эксплуатационные издержки на абразивно-отрезной круг.

Минимальные приведенные затраты на один рез являются функцией многих переменных, основной из которых является подача круга  $V_n$ .

Приведенные затраты на один рез в общем случае равны [7]:

$$Z_p = \frac{C_o + E_H \cdot K}{\Pi}, \quad (1)$$

где  $Z_p$  – затраты на один рез, руб.;

$C_o$  – балансовая стоимость станка за срок эксплуатации, руб.;

$E_H = 0,15$  – нормативный коэффициент эффективности;

$K$  – капитальные вложения, руб.;

$\Pi$  – производственная программа за срок эксплуатации, шт.;

$$C_o = C_u + C_n, \quad (2)$$

где  $C_u$  – балансовая стоимость инструмента за срок эксплуатации, руб.;

$C_n$  – балансовая стоимость прочих затрат за срок эксплуатации, руб.

Учитывая, что  $\Pi = f(V_n)$ , получим:

$$Z_p = \frac{C_u}{f(V_n)} + \frac{C_n + E_H K}{f(V_n)}, \quad (3)$$

или  $Z_p = Z_u(V_n) + Z_n(V_n)$ ,  $(4)$

где  $Z_u$  – затраты на инструмент,  $Z_n$  – прочие затраты.

Затраты на инструмент аппроксимируются полиномом:

$$Z_u(V_n) = B_1 + B_2 V_n + \frac{B_3}{V_n^2}. \quad (5)$$

Прочие затраты аппроксимируются полиномом:

$$Z_n(V_n) = B_1 + \frac{B_2}{V_n} + \frac{B_3}{V_n^2}. \quad (6)$$

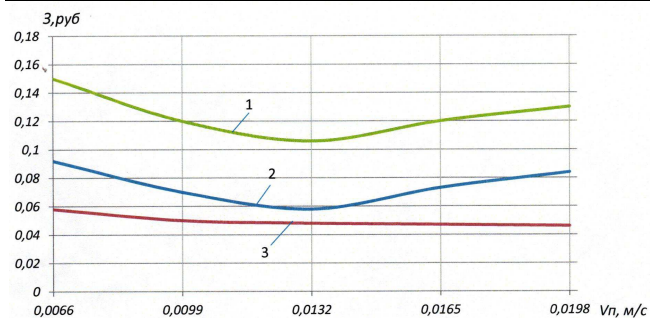
Таким образом, приведенные затраты на один рез  $Z_p$  можно представить в виде затрат на один рез на инструмент  $Z_u$ , которые зависят от скорости износа круга, и в виде прочих затрат  $Z_n$ , которые, в свою очередь, зависят от производительности процесса резания и уменьшаются с увеличением величины подачи  $V_n$ .

Затраты  $Z_n$  включают в себя как текущие, так и капитальные затраты потребителя: сдельную заработную плату рабочих, основную и дополнительную, отчисления на социальное страхование; затраты на амортизацию и содержание здания, занимаемого станком; затраты на амортизацию и содержание служебно-бытовых помещений; затраты на амортизационные отчисления на полное восстановление оборудования с учетом затрат по его доставке и установке; затраты на ремонт станка и техническое обслуживание; затраты на силовую электроэнергию.

Затраты на инструмент  $Z_u$  – величина переменная и зависит от многих факторов, влияющих на скорость износа круга: подачи круга, скорости резания, площади сечения разрезаемой заготовки, качества абразивно-отрезных кругов.

При постоянной скорости резания и площади сечения заготовки скорость подачи круга является переменным параметром, с помощью которого можно найти оптимальный режим, обеспечивающий минимальный износ круга, т. е. минимальные затраты  $Z_u$ .

На рисунке 2 приведены графики зависимости затрат на один рез  $Z_p$  (1), затрат на инструмент  $Z_u$  (2) и прочих затрат  $Z_n$  (3), от скорости подачи круга  $V_n$  при разрезании заготовок из стали 45 ГОСТ 1050-1013 диаметром 0,06 м, кругами марки 41-400x4x32 14А 80-Н 41-43ВФ ГОСТ 21963-2002. со скоростью резания 80 м/с без охлаждения. При расчете затрат на один рез  $Z_p$  принималась оптовая цена абразивно-отрезного круга  $Z_k$ , равная 9,85 руб/шт.



**Рисунок 2** – Зависимость затрат на один рез  $Z_p$  (1), затрат на инструмент  $Z_u$  (2), прочих затрат  $Z_{п}$  (3), от скорости подачи круга  $V_{п}$  при разрезании заготовки диаметром  $b_3=0,06$  м со скоростью резания 80 м/с

Разрезание заготовок возможно было в трёх режимах: наладочном, автоматическом максимально производительном и автоматическом максимально эффективным, за счет автоматизированного поиска оптимальной подачи.

При разрезании заготовок в автоматическом максимально производительном режиме, подача задавалась с помощью задатчика-патенциометра, соответствующая 100% нагрузке электродвигателя главного привода и была равна 0,0198 м/с.

При разрезании заготовок в автоматическом максимально эффективном режиме производился автоматизированный поиск оптимальной подачи в пределах от 30% до 100% нагрузке электродвигателя главного привода, что равно 0,066 м/с и 0,0198 м/с соответственно.

Поиск оптимальной подачи осуществлялся от минимальной в сторону её увеличения с шагом поиска, равным 0,0011 м/с, и ограничивался шагом, при котором начинала возрастать стоимости одного реза. После этого начинался внутришаговый поиск подачи в сторону её уменьшения с шагом, равный 0,000275 м/с, до первого шага, при котором стоимость одного реза начинала возрастать. Далее осуществлялся один шаг внутришагового поиска, шаг в сторону увеличения подачи, и она запоминалась как оптимальная. В результате поиска была определена оптимальная подача, равная 0,0132 м/с, соответствующая максимальной эффективности процесса резания.

При анализе (рис. 2, кривая 1) можно сделать вывод, что стоимость одного реза на подаче 0,0198 м/с соответствующей максимальной производительности равна 0,131 руб., что превышает на 23% стоимость одного реза, равную 0,106 руб., на подаче 0,0132 м/с которая соответствует максимальной эффективности процесса резания.

Данные, полученные путем расчета на PC методом наименьших квадратов по стандартной программе и экспериментальным путем, показывают, что коэффициент парной корреляции, определяющий линейную зависимость приведенных затрат на один рез  $Z_p$  от приведенных затрат на инструмент  $Z_u$  равен 0,983. Это позволяет сделать вывод о достаточно тесной линейной зависимости этих величин.

### Заключение

На основании изложенного можно сделать следующее заключение:

1. Предложена конструкция абразивно-отрезного станка, позволяющая с помощью процессорного устройства в автоматизированном режиме осуществлять пошаговый поиск оптимальной подачи, соответствующей максимальной эффективности и максимальной производительности процесса резания.
2. Установлено, что оптимальная подача, соответствующая максимальной эффективности, и подача, соответствующая максимальной производительности, могут не совпадать по величине, что установлено в проведенных экспериментальных исследованиях.
3. При разрезании заготовок из стали 45 ГОСТ 1050-1013 диаметром 0,06 м кругами марки 41-400x4x32 14A 80-Н 41-43BF ГОСТ 21963-2002 со скоростью резания 80 м/с без охлаждения стоимость одного реза при подаче 0,0198 м/с, соответствующей максимальной производительности равна 0,13 руб., что превышает на 23% стоимость одного реза, равную 0,106 руб., при подаче

0,0132 м/с, соответствующей максимальной эффективности процесса резания.

4. Данные, полученные путем расчета на PC методом наименьших квадратов по стандартной программе и экспериментальным путем показывают, что коэффициент парной корреляции, определяющий линейную зависимость приведенных затрат на один рез  $Z_p$  от приведенных затрат на инструмент  $Z_u$ , равен 0,983. Это позволяет сделать вывод о достаточно тесной линейной зависимости этих величин.

### Список цитированных источников

1. Farmer, D. A. Economics Factors in Abrasive Machining / D. A. Farmer, M. C. Shaw // Tool and Manufacturing Engineer. – Vol. 59. – P. 42.
2. Farmer, D. A. Economics of the Abrasive Cut-Off Operationen / D. A. Farmer, M. C. Shaw // Trans ASME. – 1967. – Vol. B89. – P. 514.
3. 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.
4. Старовойтов Н. А. Экспериментальные исследования эффективности поддержания постоянной скорости резания при износе круга на абразивно-отрезных станках с качающейся шпиндельной бабкой / Н. А. Старовойтов // Вестник БГУ – 2019. – № 3 – С. 84–92.
5. Старовойтов, Н. А. Анализ путей повышения эффективности абразивно-отрезных станков с качающейся шпиндельной бабкой / Н. А. Старовойтов, С. В. Рогов // Современные проблемы машиноведения : тезисы докладов XII международной научно-технической конференции. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 37–39.
6. Володько, Г. Ф. Выбор мощности привода абразивно-отрезных станков / Г. Ф. Володько, Н. Н. Платонов // Станки и инструмент. – 1979. – № 2 – С. 17–18.
7. Говсиевич, Р. Е. Определение экономического эффекта от производства и применения новых металлорежущих станков общего и специализированного назначения / Р. Е. Говсиевич, С. А. Сибота, Н. Л. Соловьев [и др.]. – М. : ЭНИМС, 1979. – С. 88.

### References

1. Farmer, D. A. Economics Factors in Abrasive Machining / D. A. Farmer, M. C. Shaw // Tool and Manufacturing Engineer. – Vol. 59. – P. 42.
2. Farmer, D. A. Economics of the Abrasive Cut-Off Operationen / D. A. Farmer, M. C. Shaw // Trans ASME. – 1967. – Vol. B89. – P. 514.
3. Starovojtov N. A. Matematicheskoe modelirovanie processa iznosa abrazivno-otreznyh krugov pri garmonicheskikh kolebaniyah / N. A. Starovojtov // Materialy, tekhnologii, instrumenty. – 2015. – T 20, № 2 – S. 41–45.
4. Starovojtov, N. A. Eksperimental'nye issledovaniya effektivnosti podderzhaniya postoyannoj skorosti rezaniya pri iznose kruga na abrazivno-otreznyh stankah s kachayushchejsya shpindel'noj babkoj / N. A. Starovojtov // Vestnik BRU – 2019. – № 3 – S. 84–92.
5. Starovojtov, N. A. Analiz putej povysheniya effektivnosti abrazivno-otreznyh stankov s kachayushchejsya shpindel'noj babkoj / N. A. Starovojtov, S. V. Rogov // Sovremennye problemy mashinovedeniya : tezisy dokladov XII mezhduna-rodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. – Gomel' : GGTU im. P. O. Suhogo, 2018. – С. 37–39.
6. Volod'ko, G. F. Vybtor moshchnosti privoda abrazivno-otreznyh stankov / G. F. Volod'ko, N. N. Platonov // Stanki i instrument. – 1979. – № 2 – S. 17–18.
7. Govsieovich, R. E. Opredelenie ekonomicheskogo efekta ot proizvodstva i primeneniya novyh metallorrezhushchih stankov obshchego i specializirovannogo naznacheniya / R. E. Govsieovich, S. A. Sirota, N. L. Solov'ev [i dr.]. – M. : ENIMS, 1979. – S. 88.

Материал поступил в редакцию 13.10.2020