

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОЩНОСТЬЮ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ НА АБРАЗИВНО-ОТРЕЗНЫХ СТАНКАХ С КАЧАЮЩЕЙСЯ ШПИНДЕЛЬНОЙ БАБКОЙ

Н. А. Старовойтов

К. т. н., доцент кафедры «Технология машиностроения»

УО «Гомельский государственный технический университет», Гомель, Беларусь, e-mail: starnik49@mail.ru

Реферат

Приведены результаты экспериментальных исследований повышения производительности абразивно-отрезных станков с поддержанием постоянной скорости резания и адаптивным управлением мощностью процесса резания заготовок круглого профиля.

Установлено, что поддержание постоянной скорости резания при износе абразивно-отрезного круга и поддержание постоянной мощности резания за счёт изменения подачи в процессе резания круглых заготовок приводит к увеличению производительности станка в среднем 1,38 раза по сравнению с процессом резания с постоянной скоростью подачи.

Ключевые слова: абразивно-отрезной круг, коэффициент шлифования, адаптивное управление, мощность резания.

ADAPTIVE POWER CONTROL OF THE CUTTING PROCESS ON ABRASIVE CUTTING MACHINES WITH A SWINGING SPINDLE HEAD

N. A. Starovoirov

Abstract

The results of experimental studies of increasing the productivity of abrasive cutting machines with maintaining a constant cutting speed and adaptive power control of the cutting process of round profile blanks are presented. It has been found that maintaining a constant cutting speed during wear of the abrasive-cutting wheel and maintaining a constant cutting power by changing the feed during the cutting of round blanks leads to an increase in machine productivity by an average of 1.38 times compared to the process with a constant feed rate.

Keywords: abrasive cutting wheel, grinding coefficient, adaptive control, cutting power.

Введение

В литературе [1,2] указано, 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 одного реза достигает до 71 % [3]. Снижение износа круга при использовании оптимальной подачи приводит к повышению коэффициента шлифования G , равного отношению площади разрезаемого сечения заготовки S_z к площади изношенной части круга S_u

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

Коэффициент шлифования G зависит от подачи круга, при этом подача считается оптимальной, при которой коэффициент G будет максимальным, а стоимость одного реза будет минимальной. Но это не всегда соответствует максимальной производительности, при которой время реза будет минимальным.

В статье [2] приведен алгоритм поиска оптимальной подачи в автоматизированном режиме, что приводит к повышению эффективности процесса резания за счет снижения стоимости одного реза, что не всегда соответствует максимальной производительности.

Однако на практике в некоторых случаях необходимо использовать режим максимальной производительности, обеспечить минимальное время резания, например, при разрезании горячих заготовок на прокатных станах [4].

Работа в режиме оптимальной эффективности не всегда приводит к эффективному использованию мощности электродвигателя главного привода при разрезании заготовок круглого сечения, в связи с тем, что в этом случае оптимальную подачу используют для максимальной длины дуги контакта круга с заготовкой, в то время как для меньших длин дуги контакта требуются большие по величине подачи [5]. Кроме того, при врезании круга в заготовку и выходе из неё имеются перебеги, которые необходимо проходить, с точки зрения повышения производительности, на максимальной подаче.

В процессе резания длина дуги контакта круга с круглой заготовкой изменяется в начале резания на входе и выходе круга от нуля до максимальной и равна диаметру заготовки плюс длина перебегов. Если поддерживать постоянный объем съема металла, т. е. постоянную мощность, на протяжении всего реза за счет переменной подачи

круга на входе и выходе круга из заготовки, то это может привести к уменьшению основного времени резания и в итоге повышению производительности. Возможно также увеличение коэффициента шлифования G , что требует экспериментальной проверки. Для проверки этого предположения было использовано адаптивное управление мощностью резания за счет применения переменной подачи круга в качестве регулятора для поддержания постоянной мощности.

На схеме рисунка 1 изображена круглая заготовка 1, расположенная на призме 2, при разрезании кругом 3.

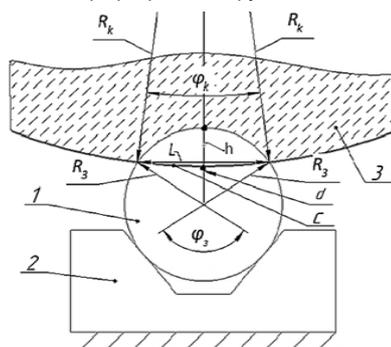


Рисунок 1 – Схема разрезания круглых заготовок абразивно-отрезным кругом

Основными переменными характеристиками процесса резания является длина дуги контакта C круга с заготовкой, подача круга F_k и скорость резания V_k . Произведение длины дуги контакта C на отношение F_k/V_k определяет объем металла, снимаемого в процессе резания в единицу времени, и определяет мощность резания.

Учитывая, что ширина пропила равна высоте круга и V_k является постоянной величиной, для упрощения разработки алгоритма адаптивного управления мощностью резания можно принять площадь сегмента срезаемого металла в единицу времени, равную произведению $F_k \cdot C$, и стремиться её поддерживать на протяжении всего реза постоянной за счет изменения скорости подачи F_k .

Для определения длины дуги контакта C можно вычислить длину хорды L по известной формуле.

$$L = \frac{\sqrt{4R_k^2 d^2 - (d^2 - R_3^2 + R_k^2)^2}}{d}, \text{ м} \quad (2)$$

где R_k и R_3 соответственно радиус круга равный 0,2 м, и радиус заготовки равной 0,03 м;

d – расстояние между центрами круга и заготовки, равное 0,23 м.

Величина d является переменной величиной и зависит от переменной h .

$$d = R_k + R_3 h + l_n \quad (3)$$

где h – глубина пропила, м,

l_n – суммарная постоянная величина перебегов при врезании круга в заготовку и выходе круга из заготовки, равная 0,02 м.

После вычисления L можно определить длину дуги контакта C по формуле

$$C = \frac{R_k \pi \arcsin \frac{L}{2R_k}}{90}, \text{ м} \quad (4)$$

На рисунке 2 приведены график 1 зависимости длины дуги контакта круга C (1) с заготовкой и оптимальной подачи круга F_k (2) при различной глубине пропила круга h с учетом его износа в процессе резания до 0,16 м. и график 2 зависимости оптимальной подачи F_k от диаметра разрезаемой заготовки d [5].

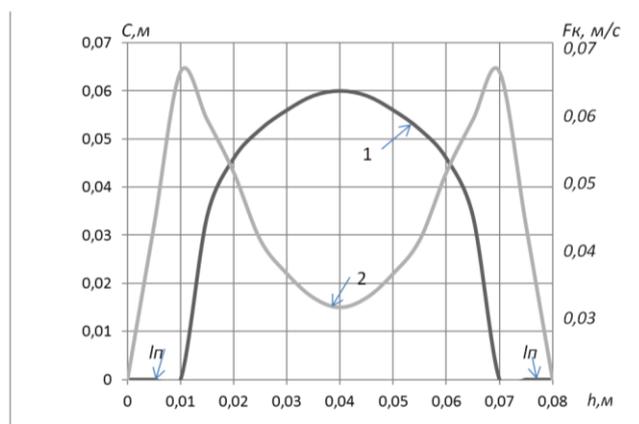


Рисунок 2 – Зависимости длины дуги контакта круга C (1), оптимальной подачи круга F_k (2), от глубины пропила разрезаемой заготовки h

Расчеты показывают, что длина дуги контакта C увеличивается по сравнению с хордой L в пределах 1–1,5 % при износе круга до минимально возможного диаметра 0,16 м и его износ можно не учитывать при программировании подачи F_k .

При разрезании заготовок абразивно-отрезными кругами важно иметь два режима: режим минимальной стоимости одного реза [2] и режим максимальной производительности, где максимально используется полная мощность главного привода на протяжении всего процесса резания. Это актуально при разрезании горячекатаных заготовок на прокатных станах при непрерывном движении заготовки, где время разрезания должно быть минимальным, что обеспечивает максимальную производительности. Решение этой задачи возможно двумя путями. Первый путь – за счет дискретного программирования параболической (сплайновой) интерполяцией кривой подачи F_k (рисунок 2). Необходимо отметить, что использование этого пути весьма трудоемко при практическом его исполнении. Процесс резания весьма специфический, производительность и эффективность его зависит от множества параметров: марки круга, зернистости, связки, скорости резания, охлаждения, марки материала, его твердости и др. Даже при одной и той же марке круга, но другого производителя, результат будет иной.

Поэтому поиск универсального процесса резания круглых заготовок, с помощью которого можно попытаться увеличить производительность, может быть поддержание постоянной мощности резания.

В работе [1] установлено, что с уменьшением длины дуги контакта требуется большая подача круга для достижения более высокого коэффициента шлифования. Отсюда можно сделать вывод, что с уменьшением длины дуги контакта подача может быть больше по сравнению с установленной для максимальной длины дуги контакта. Это может привести к увеличению производительности и некоторому увеличению коэффициента шлифования.

Целью работы является экспериментальное исследование конструктивных решений по модернизации абразивно-отрезного станка мод. 8В242 с учетом приведенных рекомендаций, направленных на повышение производительности процесса резания за счет адаптивного управления мощностью резания при разрезании круглых заготовок.

Постановка задачи, методика исследования

Экспериментальная проверка повышения производительности процесса резания абразивно-отрезных станков при разрезании круглых заготовок за счет адаптивного управления мощностью процесса резания, производилась на абразивно-отрезном станке-стенде мод. 8В242, рисунок 3 [5] с дополнительной его модернизацией.

На станке-стенде для управления электроавтоматикой станка использовалось цифровое программируемое устройство ЛИР581, частотный преобразователь ЭКТ-63/380-У4 для поддержания постоянной скорости резания 80 м/с с передаточным отношением между шкивами шпинделя и электродвигателя равным 1:1. На станине станка установлен фотоимпульсный датчик-энкодэр 11 мод. А58-Ф-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-энкодэр 13 мод. А58-Ф-500-5в. Диаметр заготовки определяет прихват-зубчатая рейка 14, которая находится в зацеплении с шестерней 15, закрепленной на валу энкодэра 16.

Цифровой сигнал с датчика 13 с помощью ЦАП преобразовывался в аналоговое значение, что обеспечивало поддержание начальной постоянной скорости резания, равной 80 м/с

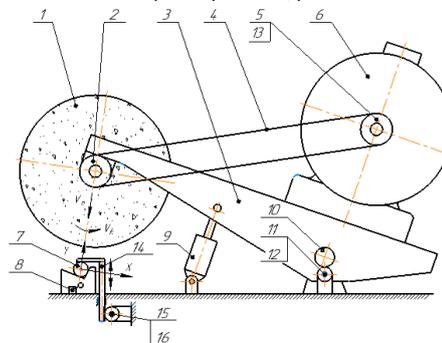


Рисунок 3 – Принципиальная схема конструкции абразивно-отрезного модернизированного станка-стенда мод. 8В242

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, диаметра круга и текущего значения глубины пропила h кругом заготовки. Во время отвода круга 1 увеличивается его частота вращения пропорционально износу круга. При зажиме заготовки прихватом-рейкой 14 вращался вал 15 энкодэра 16. По цифровому сигналу, считываемому с энкодэра 16, определялся диаметр разрезаемой заготовки.

На рисунке 4 приведена гидравлическая схема адаптивного управления мощностью резания за счет изменения подачи, которая используется в качестве регулятора процесса резания. Давление в гидросистеме поддерживается с помощью редукционного гидроклапана МКР10-100-2(1). Для задания постоянной величины пода-

чи применялся регулятор потока МПГ55-32(5) с ручным управлением. Для задания переменной подачи круга в автоматическом режиме дополнительно встроен электрогидравлический регулятор потока с пропорциональным управлением РП10 (3), управляющий подачей круга в автоматическом режиме от ЛИР581.

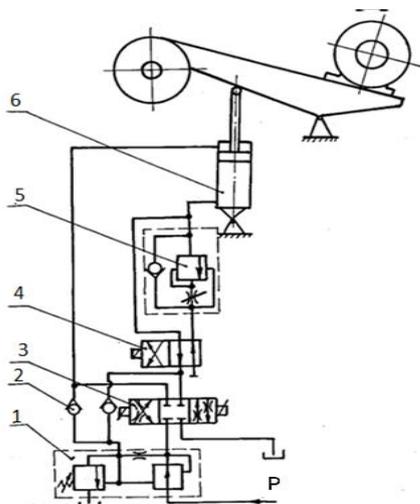


Рисунок 4 – Гидравлическая схема адаптивного управления мощностью резания за счет переменной скорости подачи

Гидрораспределитель Р102(4) позволяет производить переключение с ручного управления скоростью подачи с помощью регулятора потока 5 в автоматическое, с помощью электрогидравлического регулятора потока 3 и обратно.

Для поддержания постоянной мощности резания (рисунок 5) использовался преобразователь мощности Е829НП/17(1), учитывающий параметры тока и напряжения электродвигателя 4А180М2У3 мощностью 30 кВт. Аналоговый сигнал с преобразователя 1 поступает в суммирующее устройство К56ИМ1(2). С помощью выключателя В1 можно задать любую мощность резания в пределах характеристики электродвигателя, увеличивая или уменьшая мощность резания, можно также менять нижний предел подачи круга.

Одновременно с программного устройства ЛИР581 поступает аналоговый сигнал задания U_3 на суммирующее устройство 2 и далее на блок управления электрогидравлическим регулятором потока с пропорциональным управлением РП10 (3), который задает переменную подачу на протяжении всего процесса резания.

В процессе резания с возрастанием длины дуги контакта круга с заготовкой возрастающий отрицательный сигнал от преобразователя мощности 1 вычитается суммирующим устройством с сигнала от ЛИР581 и поступает в блок управления БУ2110(3).

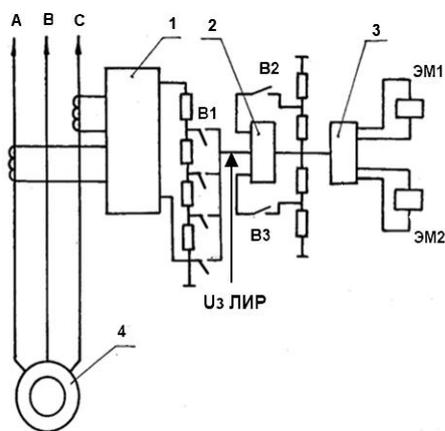


Рисунок 5 – Электрическая схема адаптивного управления мощностью резания за счет переменной скорости подачи

Таким образом уменьшается подача круга при увеличении длины дуги контакта круга с заготовкой. С с помощью контактов реле В2

и В3 включаются электромагниты ЭМ1 и ЭМ2, и осуществляется рабочая подача и обратный ход круга.

На рисунке 6 приведены осциллограммы зависимости времени резания t_p от мощности резания $P(1,3)$ и скорости подачи круга $F_k(2,4)$ при разрезании круглых заготовок из стали 45 диаметром 0,06 м с адаптивным управлением мощностью резания с переменной (2) и с постоянной подачей (4).

Осциллограмма снималась с помощью программы Power Graph Professional с применением сетевых фильтров мод. DL-100EA1 для подавления высокочастотных составляющих тока и напряжения. Оцифровка графиков производилась с помощью программы Graph2Digit. Исследования проводились в лаборатории СКБ ОЦ ОАО «СтанкоГомель».

Разрезались круглые заготовки из стали из стали 45 Гост 1050-88 диаметром от 0,02 м до 0,06 м кругами марки 41-400х4х32 14А 80-Н 41-43BF ГОСТ 21963-2002. со скоростью резания 80 м/с без охлаждения в режиме адаптивного управления с постоянной мощностью с переменной подачей (рисунок 6 (1,2)) и в режиме с переменной мощностью и постоянной подачей (рисунок 6 (3,4)).

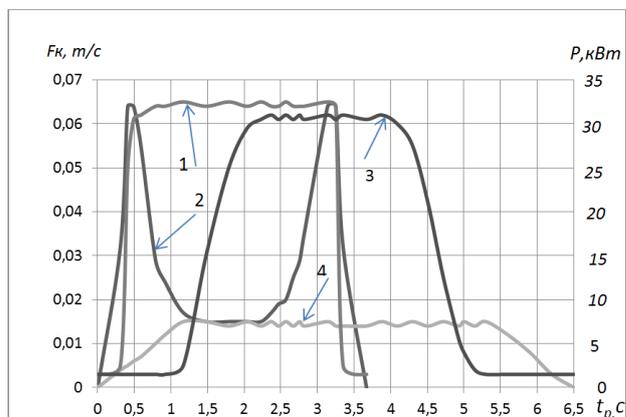


Рисунок 6 – Осциллограммы зависимости времени резания t_p от мощности резания P (1) и переменной скорости подачи F_k (2) при адаптивном процессе резания и мощности резания P (3) с постоянной подачей F_k (4), при разрезании круглой заготовки

В режиме адаптивного управления мощностью подача с программируемого цифрового устройства ЛИР581 задавалась максимальной подачей, равная 0,064 м/с, а на преобразователе мощности (рисунок 5 Е829НП/17(1) задавалась мощность 30 кВт, соответствующая максимальной длине дуги контакта круга с заготовкой.

В режиме резания с постоянной подачей величина подачи задавалась соответствующая максимальной мощности при максимальной длине дуги контакта круга с заготовкой 30 кВт (рисунок 6 (3,4) [6].

При анализе результатов экспериментальных исследований установлено, что при разрезании заготовок диаметром 0,02 м повышение производительности незначительное. Коэффициент увеличения производительности равен $K_{np}=1,05$:

$$K_{np} = \frac{t_{pn}}{t_{pa}}, \quad (5)$$

где t_{pn} – время резания в режиме с постоянной подачей, сек;
 t_{pa} – время резания в режиме адаптивного управления мощностью с переменной подачей, сек.

В данном случае мощность при резании заготовок диаметром 0,02 м мало отличается от мощности холостого хода и управляющий сигнал от преобразователя мощности незначительный. Время резания в адаптивном режиме управления мощностью составляет 1,65 сек, а в режиме с постоянной подачей 1,73 сек, коэффициент производительности K_{np} равен 1,05.

При разрезании заготовок диаметром от 0,02 м до 0,04 м коэффициент производительности K_{np} увеличился до 1,37, при разрезании заготовок диаметром от 0,04 до 0,06 м – до 1,77.

Значительное повышение производительности от 20 % до 48 % при резании круглых заготовок диаметром от 0,03 м до 0,06 м при

адаптивном режиме резания происходило за счет прохождения кругом перебогов на ускоренном ходу с максимальной подачей.

На рисунке 7. приведены графики зависимости времени резания t_{pa} , t_{pn} и коэффициента повышения производительности K_{np} от диаметра разрезаемой заготовки d при адаптивном управлении мощностью процесса резания с переменной подачей и процесса резания с постоянной подачей.

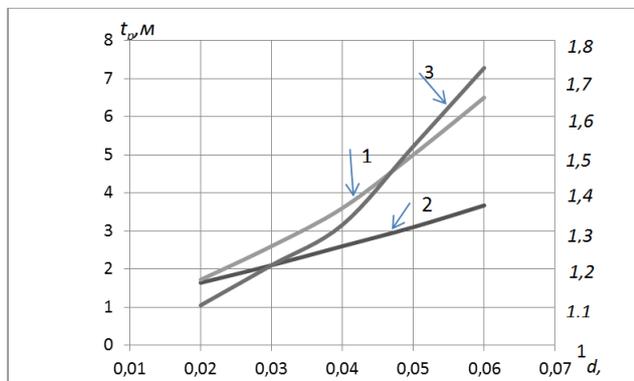


Рисунок 7 – Зависимости времени резания t_{pa} (1) и t_{pn} (2) и коэффициента повышения производительности K_{np} (3) от диаметра разрезаемой заготовки d при адаптивном управлении мощностью процесса резания с переменной подачей и процесса резания с постоянной подачей

Заключение

На основании изложенного можно сделать следующее заключение:

- Предложена конструкция абразивно-отрезного станка, позволяющая с помощью процессорного устройства производить адаптивное управление мощностью резания круглых заготовок за счет изменения подачи круга во время реза с целью достижения максимальной производительности.
- Анализ данных показывает, что при адаптивном управлении мощностью резания за счёт изменения скорости подачи с помощью электрогидравлического распределителя РП-10 с пропорциональным управлением с дросселированием на входе и выходе гидроцилиндра при разрезании круглых заготовок диаметром от 0,02 м до 0,06 м., что коэффициент шлифования возрастает в среднем на 2–3 %.
- Незначительное увеличение коэффициента шлифования можно объяснить возросшими нагрузками на зерно круга при врезании в заготовку, что подтверждается наличием в шламе от абразивно-отрезного круга большого количества целых зерен и также неполным совпадением подачи круга при адаптивном процессе резания (рисунок 6 (2) с оптимальной подачей (рисунок 2 (2), обеспечивающей максимальное повышение коэффициента шлифования.
- На основании результатов экспериментальной проверки эффективности конструктивных решений и рекомендаций, направленных на увеличение производительности, установлено, что применение режима адаптивного управления мощностью резания коэффициента производительности K_{np} при разрезании круглых заготовок диаметром от 0,02 м до 0,04 м возрастает с 1,05 до 1,37, диаметром от 0,04 м. до 0,06 м. – до 1,77.
- Значительное повышение производительности от 20 до 48 % при резании круглых заготовок диаметром от 0,03 м до 0,06 м при адаптивном режиме резания происходит за счет перемещения кругом перебогов на ускоренном ходу с максимальной подачей.
- Данные, полученные путем расчета на РС методом наименьших квадратов по стандартной программе и экспериментальным путем, показывают, что коэффициенты парной корреляции, определяющие линейную зависимость времени резания t_{pa} и t_{pn} от диаметра разрезаемой заготовки d при адаптивном режиме резания, равен $r_a = 0,988$, при режиме резания с постоянной подачей $r_n = 0,983$. Это позволяет сделать вывод о достаточно тесной линейной зависимости обеих этих величин от параметра d .

Список цитированных источников

- Storm, T. Adaptive control in cut-off grinding."Adv. Mach / T. Storm // Tool Des and Res. – 1970. – Vol.A".Oxford e/a. – 455–464.
- Старовойтов, Н. А. //Повышение эффективности использования абразивно-отрезных станков за счет автоматизированного поиска оптимальных режимов резания/ Н. А. Старовойтов, С. В. Рогов // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2020. – №4: Машиностроение. – С. 10–12.
- 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. 68–69.
- Геллетсбергер, Х. Горячее отрезание шлифовальным кругом на сталепрокатных заводах. Современный технический уровень, тенденции / Х. Геллетсбергер // Современная техника Австрии: тез. доклад – Москва : Красная Пресня, 1981. – С. 8–12.
- 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.
- Володько, Г. Ф. Выбор мощности привода абразивно-отрезных станков / Г.Ф.Володько, Н. Н. Платонов // Станки и инструмент. – 1979. – №2. – С.17–18.

References

- Storm, T. Adaptive control in cut-off grinding."Adv. Mach / T. Storm // Tool Des and Res. – 1970. – Vol.A".Oxford e/a. – 455–464.
- Starovojtov, N. A. //Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya abrazivno-otreznyh stankov za schet avtomatizirovannogo poiska optimal'nyh rezhimov rezaniya/ N. A. Starovojtov, S. V. Rogov// Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2020. – №4: Mashinostroenie. – S. 10–12.
- Starovojtov, N. A. Analiz putej povysheniya effektivnosti abrazivno-otreznyh stankov s kachayushchejsya shpindel'noj bab-koj / N. A. Starovojtov, S. V. Rogov // Sovremennye problemy mashinovedeniya : (tezisy dokladov XII mezh-dunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii). – Gomeľ, GGTU im. P. O. Suhogo, 2018. – S. 68–69.
- Gelletsberger, H. Goryachee otrezanie shlifoval'ny'm krugom na staleprokatnyh zavodah. Sovremennyy tekhnicheskij uroven', tendencii / H. Gelletsberger // Sovremennaya tekhnika Avstrii: tez. doklad – Moskva : Krasnaya Presnya, 1981. – S. 8–12.
- Starovojtov, N. A. Eksperimental'nye issledovaniya effektivnosti podderzhanii postoyannoj skorosti rezaniya pri iznose kruga na abrazivno-otreznyh stankah s kachayushchejsya shpindel'noj bab-koj / N. A. Starovojtov // Vestnik BRU – 2019. – № 3 – S. 84–92.
- Volod'ko, G. F. Vybór moshchnosti privoda abrazivno-otreznyh stankov / G.F.Volod'ko, N. N. Platonov // Stanki i instrument. – 1979. – №2. – S.17–18.

Материал поступил 24.08.2022, одобрен 05.11.2022, принят к публикации 11.11.2022