

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 681.52

doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-12-20

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЗАЧИСТНЫМИ МОДУЛЯМИ МАШИНЫ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КРОМОК ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК

Михаил Сергеевич Чепчуров^{1✉}, Борис Сергеевич Четвериков²,
Виктория Евгеньевна Минасова³, Денис Сергеевич Баранов⁴,
Сергей Николаевич Санин⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,

г. Белгород, Россия

¹ avtpost@mail.ru

² await_rescue@mail.ru

³ vika314tm@mail.ru

⁴ den-3218@yandex.ru

⁵ sanin.sn@bstu.ru

Аннотация. Работа посвящена вопросам, касающимся управления процессом механической обработки кромок листовых заготовок, а именно их зачистки. Необходимость операции зачистки обусловлена низким качеством поверхностей листового материала, что влечет за собой как снижение качества готовой продукции, так и дополнительные материальные и временные затраты на исправление брака. В связи с этим задача разработки эффективного алгоритма управления зачистными модулями является актуальной. Проведенный анализ временных затрат технологического процесса зачистной машины в условиях реального производства показал, что основные затраты приходятся именно на процесс зачистки листового материала. Авторами предложена конструкция зачистной машины и алгоритм автоматического управления её модулями. Разработанная схема снятия показаний и регистрации износа зачистного круга позволяет регистрировать параметры технологического процесса в реальном времени и корректировать процесс износа абразивного зачистного круга, являющегося основным элементом зачистного модуля. Авторами установлено, что суммарную длину пробега рабочей поверхности зачистного круга можно использовать для прогнозирования износа, а критический диаметр зачистного круга – для ограничения его предельного используемого диаметра. На основе этого было доказано, что алгоритм управления зачистным модулем машины очистки кромок листовых заготовок должен содержать блок, реализующий обратную связь по диаметру абразивного круга и обеспечивающий постоянство скорости резания. Дополнительно задаваемые параметры процесса снятия материала позволяют по значению тока привода при постоянстве скорости резания обеспечивать качество зачищаемой поверхности листа.

Ключевые слова: зачистная машина, абразивный круг, листовая заготовка, автоматическое управление, алгоритм

Исследование выполнено в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Для цитирования: Чепчуров М.С., Четвериков Б.С., Минасова В.Е., Баранов Д.С., Санин С.Н. Автоматическое управление зачистными модулями машины для механической обработки кромок листовых заготовок // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №1 (27). С. 12-20. doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-12-20.

Original article

Open Access Article

AUTOMATIC CONTROL OF DEBURRING MODULES IN A MACHINE FOR THE MECHANICAL EDGE PROCESSING OF SHEET METAL BLANKS

Mikhail S. Chepchurov^{1✉}, Boris S. Chetverikov², Victoria E. Minasova³, Denis S. Baranov⁴, Sergey N. Sanin⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

¹ avtpost@mail.ru

² await_rescue@mail.ru

³ vika314tm@mail.ru

⁴ den-3218@yandex.ru

⁵ sanin.sn@bstu.ru

Abstract. *This work addresses issues related to controlling the mechanical edge processing of sheet metal blanks, specifically their deburring. The necessity of the deburring operation is due to the low surface quality of sheet material, which leads to both a reduction of finished product quality and additional material and time costs for correcting defects. Therefore, the task of developing an effective control algorithm for deburring modules is highly relevant. An analysis of the time costs of the deburring machine technological process in a real-world production setting has shown that the main costs are associated with deburring sheet material itself. The authors propose a design for a deburring machine and an algorithm for the automatic control of its modules. The developed scheme for taking readings and registering deburring wheel wear allows for the real-time registration of technological process parameters and the correction of the wear process of the abrasive deburring wheel, which is the main element of the deburring module. The authors have established that the total length of the working surface travel of the deburring wheel can be useful to predict wear, and the critical diameter of the deburring wheel can be applicable to limit its maximum usable diameter. Based on this, the work has proven that the control algorithm for the machine deburring module of the sheet metal blank edge cleaning should include a block implementing feedback on the abrasive wheel diameter, ensuring a constant cutting speed. Additionally, predefined parameters for the material removal process, based on the drive current value at a constant cutting speed, allow for ensuring the quality of the deburred sheet surface.*

Keywords: deburring machine, abrasive wheel, sheet metal blank, automatic control, algorithm

The study was carried out as part of the federal program for supporting universities «Priority 2030» using equipment based on the High Technology Centre of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

For citation: Chepchurov M.S., Chetverikov B.S., Minasova V.E., Baranov D.S., Sanin S.N. Automatic Control of Deburring Modules in a Machine for the Mechanical Edge Processing of Sheet Metal Blanks. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 1 (27). pp. 12-20. doi: 10.30987/2658-6436-2025-1-12-20.

Введение

Производство жестяной тары требует операции подготовки заготовок под сварку. Необходимость в этой операции возникает по причинам низкого качества поверхности листового материала, поступающего производителю, а также брака при нанесении различных лакокрасочных материалов. Автоматической линией производства жестяной тары не предусматривается предварительная зачистка листовых заготовок, что вызывает брак при сварке листа. Авторы столкнулись с задачей исключения брака при изготовлении жестяной тары в автоматической линии, в случае брака при нанесении покрытия и наличия окалины на краях листовой заготовки.

В различных публикациях предлагается решение этой задачи с использованием зачистных машин. Например, некоторые авторы утверждают, что для выполнения зачистки листовых заготовок мало используются зачистные машины, а чаще присутствуют ручные операции [1]. Также в работе [2] проведен анализ способов очистки листового материала как традиционными механическими способами, так и современными, ещё мало используемыми, такими как лазерная и криогенная очистка. Авторы этих работ делают упор на ручную очистку, но такая очистка не пригодна при высокой производительности оборудования, например, при производительности автоматической линии до 40...50 изделий в минуту. В этом случае для выполнения зачистки требуется автоматическое оборудование. Так, например, при производительности автоматической линии 40 изделий в минуту для сохранения такта выпуска требуется производительность зачистного оборудования не менее

45 изделий в минуту [3]. При этом скорость перемещения заготовки зависит от длины зачищаемой полосы, т.е. время выполнения зачистной операции складывается из времени подачи листа в зону зачистки, времени прохождения листа через зону зачистки, а также времени стопировки листа (рис. 1).



Рис. 1. Схема временных затрат процесса работы зачистной машины
Fig. 1. Scheme of time consumption of the stripping machine operation process

Согласно схеме, показанной на рис. 1, значительное время в производственном цикле составляет время зачистки, но это требование самого процесса. При цикле зачистки примерно 1,5 с, время зачистки составляет примерно 1 с. При максимальной длине заготовки 500 мм скорость её перемещения составляет 0,5 м/с. Многие авторы при подобной производительности отдают предпочтение механическим способам очистки [4, 5], выполняемым с использованием специального инструмента, например, иглофрез [6]. Этот способ очистки имеет свои неоспоримые преимущества по производительности и стойкости инструмента, но из-за свойств самого инструмента не представляется возможность обеспечить точность кромки покрытия, полученного полиграфией.

В то же время для обеспечения точности кромки возможно использование абразивных кругов на различной связке, чаще всего рекомендуются круги на бакелитовой связке или круги на полимерной связке.

При этом присутствует необходимость выбора инструмента по стойкости и производительности, что требует проведения экспериментальных исследований. Создание отдельной экспериментальной установки – эффективный, но затратный метод.

По этой причине авторами было принято решение о создании установки с зачистными модулями, а подбор круга предлагается выполнить по результатам экспериментального исследования.

Оборудование и методы

В качестве зачистных модулей используются устройства, конструкция которых представлена на рис. 2. Устройства имеют приводы абразивного диска, расположенные на качалках, являющихся основаниями под приводы.

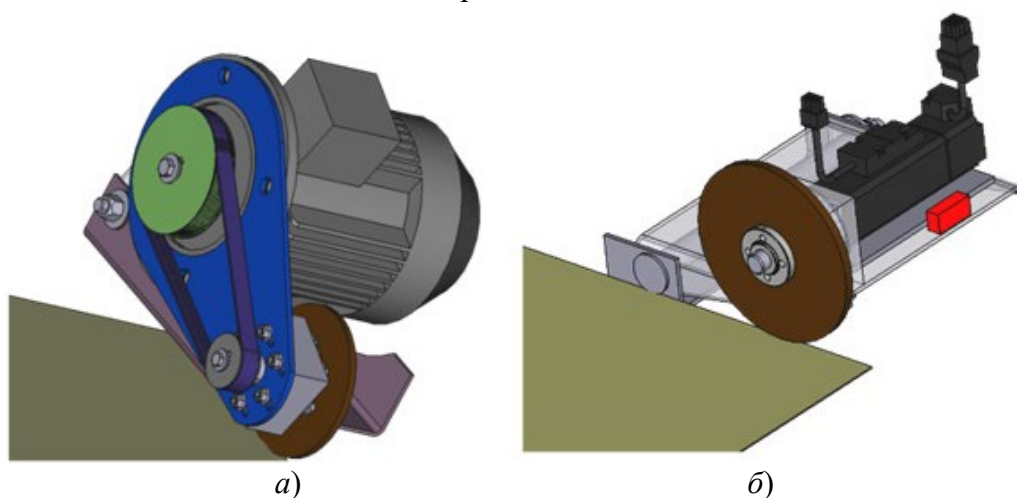


Рис. 2. Конструкции зачистных модулей:
a – с поликлиномременной передачей; б – с прямым высокооборотным приводом

Fig. 2. Designs of stripping modules:
a – with poly-V-belt transmission; b – with direct high-speed drive

Приводы имеют шпиндельные узлы, на выходных валах которых установлены абразивные зачистные диски. Отличие модуля, представленного на рис. 2, а, от модуля, представленного на рис. 2, б, состоит в том, что в модуле, показанном на рис. 2, а, вращающий момент от двигателя к абразивному диску передаётся с помощью поликлиноремённой передачи, а в модуле на рис. 2, б вал двигателя напрямую с помощью эластичной муфты соединён с валом шпинделя, на котором установлен абразивный диск.

В первом случае возможно использование обычного асинхронного двигателя, а во втором – специального высокоскоростного. Качалки имеют возможность поворота вокруг оси, установленной в основании.

При реализации схемы, согласно [7], данные о диаметре круга, полученные с помощью акселерометра *A* заносятся в обычные текстовые файлы, которые потом можно обработать любым редактором электронных таблиц, при этом регистрируется ток, потребляемый приводом. То есть это данные из ЧП, управляющего частотой вращения двигателя *M*, который посредством ременной передачи связан со шпинделем круга. Сбор данных о положении шпинделя круга и тока двигателя выполняется программируемым логическим контроллером (*PLC*), через который данные о положении шпинделя, частоте вращения вала двигателя, потребляемом токе по интерфейсу *RS485* с использованием протокола *MODBUS RTU* передаются в ПК (рис. 3).

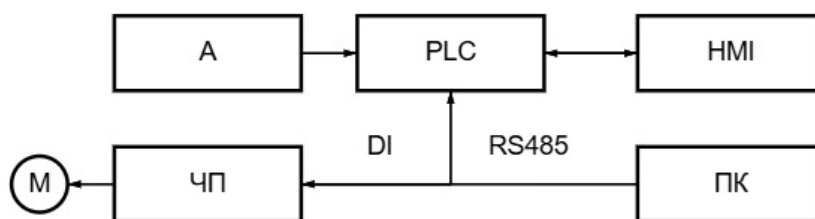


Рис. 3. Схема управления зачистным модулем:

A – акселерометр; *PLC* – программирующий логический контроллер; *HMI* – панель оператора; ПК – персональный компьютер с *Simple SCADA*; ЧП – частотный преобразователь; *M* – асинхронный двигатель

Fig. 3. Stripping module control circuit:

A – accelerometer; *PLC* – programming logic controller; *HMI* – operator panel; *PC* – personal computer with *Simple SCADA*; *FC* – frequency converter; *M* – asynchronous motor

Рассмотрим более подробно схему сбора данных. Для быстрой фиксации положения абразивного круга предпочтительно использовать передачу аналогового сигнала в *PLC*. Для этого используется аналоговый вход. Управление частотным преобразователем возможно по разным каналам, например, с использованием аналогового датчика частоты или по *RS485*. В последнем случае требуется обозначение *PLC* флажком «мастер сети», *SCADA* в ПК также должен быть установлен флажок «мастер сети», однако два флажка «мастер сети» в *RS485* установить не представляется возможным. По этой причине обозначаем флажком «мастер сети» *SCADA*, а приводом управляем с помощью аналогового сигнала *DI*. Настройки привода, управление приводом, управление сбором показаний тока и положения абразивного диска выполняется через панель оператора *HMI*. Остановимся на схеме съема показаний акселерометра для определения текущего диаметра зачистного диска, представленной на рис. 4.

Согласно схеме, представленной на рис. 4, в процессе работы круг изнашивается с диаметра $d_{кр}$ до диаметра $d_{крт}$, т.е. изменяется расстояние $O_K L_u$ на величину Δ , которую можно найти по формуле (1):

$$\Delta = \frac{d_{кр} - d_{крт}}{2}, \quad (1)$$

Поскольку расстояние между осью качания и осью шпинделя круга постоянно, то износ круга $O_K L_u$ можно найти по формуле (2):

$$O_K L_u = O_K O \cdot \cos \alpha, \quad (2)$$

где α – угол, величина которого определяется с помощью акселерометра, °.

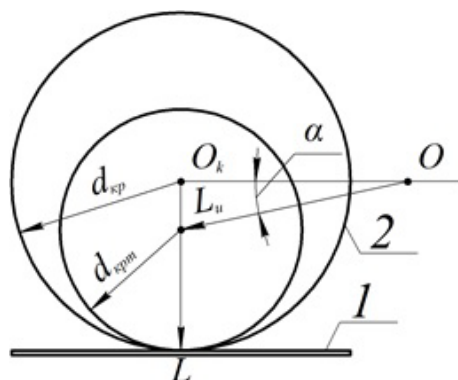


Рис. 4. Схема измерений диаметра круга:

1 – лист; 2 – зачистной круг

Fig. 4. Circle diameter measurement diagram:

1 – sheet; 2 – cleaning wheel

При этом, в зависимости от величины угла устанавливает частоту вращения круга. Обычно рабочая скорость периферийной поверхности круга указывается на его боковой поверхности. Для кругов на полимерной связке рабочая скорость составляет 40 м/с, отсюда следует, что частота вращения вала шпинделя круга, которую можно рассчитать по формуле (3), будет равна:

$$n_{\text{шт}} = \frac{1000 \cdot V}{\pi(d_{\text{кр}} - 2 \cdot O_k O \cdot \cos \alpha)}, \quad (3)$$

где V – рабочая скорость зачистного круга, м/с.

Эта формула (3) реализуется в алгоритме поддержания постоянной скорости периферии зачистного круга. Но существует фактор предельной рабочей частоты вращения вала шпинделя круга, определяемый, в значительной степени, качеством используемых в шпинделе подшипников.

Износ абразивного круга можно рассмотреть, как спираль. То есть имея износ рабочей поверхности круга по периферии как изменение диаметра круга, можно попытаться спрогнозировать его диаметр, но при этом следует ограничиться определенными условиями, например, тем что, на 1 м круга его радиус уменьшается на 0,1 мм при постоянной рабочей скорости.

Если следовать рассуждениям, приведенным в [7], то бесконечно малый отрезок дуги можно рассчитать по формуле (4):

$$dl = \sqrt{d\rho^2 + dh^2}, \quad (4)$$

где $d\rho$ – приращение радиуса ρ , при перемещении угла ϕ или $d\phi$, а также $dh^2 = \rho^2 d\phi^2$.

Отсюда получаем выражение (5):

$$dl = \sqrt{d\rho^2 + \rho^2 d\phi^2}. \quad (5)$$

Авторы в [6] приходят к выражению определение дуги архимедовой спирали в виде следующей формулы (6):

$$L = \frac{k}{2} [\phi \sqrt{1 - \phi^2} + \ln(\phi + \sqrt{1 + \phi^2})], \quad (6)$$

где k – смещение точки на спирали по лучу при повороте на один радиан, которое находится через шаг спирали t по формуле (7):

$$k = \frac{t}{2\pi}. \quad (7)$$

При постоянном шаге спирали t расстояние, которое не проходит точка контакта периферии круга, можно найти, используя формулу из [9], но согласно [10] при изменении диаметра круга изменяется пятно контакта, а именно уменьшается. К тому же принимая величину износа по линейной длине круга, учитываем, что при этом меняется диаметр, что доказывает постоянство поддерживаемой скорости.

Таким образом, задавшись износом на диаметр можно приблизительно спрогнозировать износ круга. Согласно формуле (7): приняв износ на диаметр, как величину шага архимедовой спирали, можно спрогнозировать остаточный диаметр круга, но предварительно определив суммарный угол φ .

То есть получается, что мы снова возвращаемся к суммарному пробегу периферийной поверхности:

$$L_T < L_{кр}, \quad (8)$$

где L_T – текущий пробег, мм; $L_{кр}$ – критический допустимый пробег, мм.

Согласно рис. 5: $d\rho$ и есть текущий радиус круга, то есть $d_{крт} = 2d\rho$. Это при известном и заданном шаге t и подсчитанном угле φ приводит к определению текущего износа.

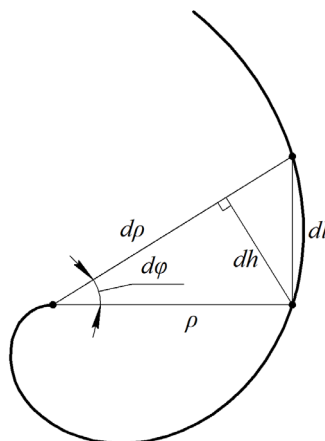


Рис. 5. Схема для расчета бесконечно малого отрезка спирали
Fig. 5. Scheme for calculating an infinitesimal segment of a spiral

Задавшись всем вышеперечисленным, изменим схему, представленную на рис. 3 и получим схема снятия показаний и регистрации износа зачистного круга, показанную на рис. 6.

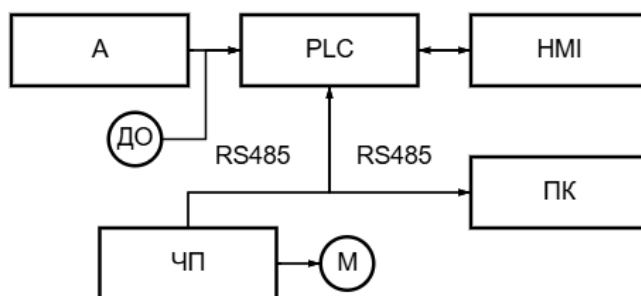


Рис. 6. Схема снятия показаний и регистрации износа зачистного круга
Fig. 6. Scheme for taking readings and recording wear on the grinding wheel

В схеме на рис. 6 появился датчик оборотов – ДО, в качестве которого может выступать энкодер или простой счетчик оборотов на основе датчика Холла.

Так как предпочтительным является подсчет только количества оборотов, то энкодер является неперспективным вариантом с точки зрения стоимости, в связи с тем, что снятие и подсчет его показаний требует больших временных и материальных затрат, а также для достижения приемлемого износа инструмента требуется совершить большое количество оборотов.

Результаты и обсуждение

Таким образом, в результате рассуждений мы получили два критических параметра: суммарную длину пробега рабочей поверхности $L_{кр}$ и критический диаметр круга $d_{крт}$. Если первый параметр ($L_{кр}$) не ограничен ничем, кроме ширины рабочей поверхности, то второй

параметр ($d_{крт}$) ограничен конструктивными характеристиками зачистного модуля. Следовательно, суммарную длину пробега рабочей поверхности можно использовать для прогнозирования износа, а критический диаметр круга – для ограничения предельного используемого диаметра инструмента. Представим алгоритм управления модулем в виде блок-схемы, изображенной на рис. 7.

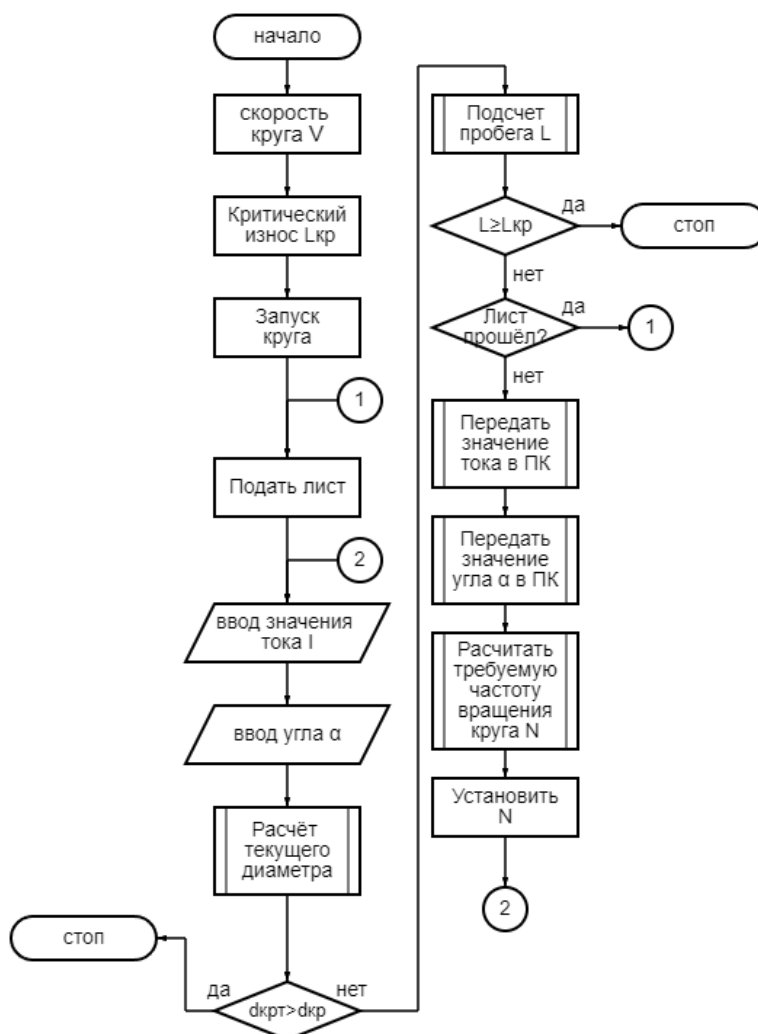


Рис. 7. Блок-схема алгоритма регистрации значений параметра инструмента и тока привода
Fig. 7. Control flow chart for recording the values of the tool parameter and drive current

Полученные значения диаметров и силы тока можно использовать для нахождения критического значения пути, а также для нахождения других показателей процесса, например, глубины резания и скорости перемещения зачищаемого листа. Например, скорость перемещения зачищаемого листа v_l можно представить следующим образом:

$$v_l = f(V, b, \delta), \quad (9)$$

где V – скорость вращения круга, мм/об; b – ширина круга, мм; δ – глубина резания, мм.

Аналогично, по результатам исследования полученных образцов скорость перемещения зачищаемого листа v_l также можно представить в виде:

$$v_l = f(V, I), \quad (10)$$

где I – сила тока, зависящая от ширины круга и глубины резания.

При этом параметры, от которых зависит ток оказывают влияние на качество получаемой поверхности. К этим параметрам сложно отнести глубину съема материала и скорость перемещения заготовки.

Ширина абразивного круга связана с шириной зачищаемой полосы, но и она оказывает влияние на потребляемый приводом ток.

Заключение

Таким образом можно сделать вывод, о том, что алгоритм управления зачистным модулем машины для механической обработки кромок листовых заготовок должен содержать блок, реализующий обратную связь по диаметру абразивного круга и обеспечивающий постоянство скорости резания.

Дополнительно задаваемые параметры процесса снятия материала позволяют по значению тока привода при постоянстве скорости резания обеспечивать качество зачищаемой поверхности листа.

Список источников:

1. Baron Y.M. Magnetic abrasive deburring technology for blanks // *International Journal of Engineering Research in Africa*. – 2016. – № 25. – С. 1-10.
2. Ягьяев Э.Э., Шрон Л.Б. Повышение эффективности и качества очистки поверхности листового металла методом лазерной абляции // *Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета*. – 2022. – № 3(77). – С. 217-223.
3. Чепчуров М.С., Четвериков Б.С. Автоматизация производственных процессов. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 274 с.
4. Пашков А.Е., Чапышев А.П. Минимизация трудоёмкости технологической последовательности «дробеударное формообразование-зачистка» при изготовлении листовых деталей // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2006. – № 8(12). – С. 42-45.
5. Галеня И.Н., Кожухова М.С., Вишневецкий В.С., Коркишко А.Н. Применение и преимущества технологии лазерной очистки металла в сравнение с традиционной пескоструйной обработкой // *Научно-технический вестник Поволжья*. – 2024. – № 2. – С. 116-120.
6. Чепчуров М.С., Четвериков Б.С., Минасова В.Е., Челядинов Д.В. Разработка алгоритма процесса снятия припуска дисковой иглофрезой с учетом угла зоны контакта иглофрезы и заготовки // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2023. – № 3. – С. 50-58.
7. Чепчуров М.С. Измерение и регистрация тока в цепи привода // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. – 2008. – № 9. – С. 46-48.
8. Соловьев А.И., Джафарова Ш.И., Савельева Л.В. Отделочно-зачистная обработка в условиях автоматизированного производства // *Технология машиностроения*. – 2019. – № 8. – С. 13-18.
9. Jiang L., Yang Z., Li Y. An optimized calculation method of the grinding wheel profile for the helical flute forming grinding // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2024. – № 132. – С. 1649-1664.
10. Yagyaev E. Stabilization of processing quality parameters at cylindrical external grinding by control of the rotational frequency of the grinding wheel // *Materials Today Proceedings*. – 2020. – № 38. – С. 1882-1885.

References:

1. Baron Y.M. Magnetic Abrasive Deburring Technology for Blanks. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2016;25:1-10.
2. Yagyaev E.E., Shron L.B. Increasing the Efficiency and Quality of Cleaning the Surface of Sheet Metal by Laser Ablation Method. *Scientific Notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University*. 2022;3(77):217-223.
3. Chepchurov M.S., Chetverikov B.S. *Automation of Productions*. Moscow: INFRA-M; 2019.
4. Pashkov A.E., Chapyshev A.P. Minimizing the Labour Intensity of the Technological Sequence “Shot Impact Shaping-Cleaning” in Manufacturing Sheet Parts. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2006;8(12):42-45.
5. Galenya I.N., Kozhukhova M.S., Vishnevsky V.S., Korkishko A.N. Application and Advantages of the Technology Laser Cleaning of Metal in Comparison With Traditional Sandblasting. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2024;2:116-120.
6. Chepchurov M.S., Chetverikov B.S., Minasova V.E., Chelyadinov D.V. Development of an Algorithm for the Process of Removing Stock With a Disk Needle Cutter Taking Into Account the Angle of the Contact Zone of the Needle Cutter and the Workpiece. *Izvestiya TulGU. Technical Sciences*. 2023;3:50-58.
7. Chepchurov M.S. Current Measurement and Registration in the Machine Drive Circuit. *Repair. Reconstruction. Modernization*. 2008;9:46-48.
8. Soloviev A.I., Dzhaфарова Sh.I., Savelyeva L.V. Finishing and Cleaning Treatment in the Automated Production Condition. *Technology in Mechanical Engineering*. 2019;8:13-18
9. Jiang L., Yang Z., Li Y. An Optimized Calculation Method of the Grinding Wheel Profile for the Helical Flute Forming Grinding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024;132:1649-1664.
10. Yagyaev E. Stabilization of Processing Quality Parameters at Cylindrical External Grinding by Control of the Rotational Frequency of the Grinding Wheel. *Materials Today Proceedings*. 2020;38:1882-1885.

Информация об авторах:

Чепчуров Михаил Сергеевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова

Четвериков Борис Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные и дорожные машины» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова

Минасова Виктория Евгеньевна

ассистент кафедры «Технология машиностроения» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова

Баранов Денис Сергеевич

ассистент кафедры «Технология машиностроения» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова

Санин Сергей Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова

Information about the authors:

Chepchurov Mikhail Sergeevich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Chetverikov Boris Sergeevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Hoist and Road Machines of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Minasova Victoria Evgenievna

Assistant at the Department of Mechanical Engineering Technology of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Baranov Denis Sergeevich

Assistant at the Department of Mechanical Engineering Technology of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Sanin Sergey Nikolaevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.**

Статья поступила в редакцию 15.11.2024; одобрена после рецензирования 13.12.2024; принята к публикации 20.12.2024.

The article was submitted 15.11.2024; approved after reviewing 13.12.2024; accepted for publication 20.12.2024.

Рецензент – Пугачев А.А., доктор технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Pugachev A.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.