

УДК 681.513.6

DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-95-104

Алгоритм адаптивного управления процессом обработки торцов пружин методом плазменной резки

С. А. Платов, ООО «НПЦ «Пружина», Ижевск, Россия

А. В. Щенятский, доктор технических наук, профессор, ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Приведен краткий обзор и общее состояние вопроса о востребованности и необходимости производства пружин для подвижного состава РАО «РЖД». Из существующих технологических способов обоснованно выбрана и применена плазменная резка как прогрессивный метод обработки материалов резанием, что необходимо для увеличения выпуска изделий. Представлены общие характеристики данного метода как альтернативного при обработке изделий из металла. Описано существующее решение по применению метода плазменной резки при обработке торцов пружин. Представлена новая структурная схема управления автоматизированным производством обработки торцов пружин комплексом оборудования в составе: промышленный робот-манипулятор Kawasaki, оборудование плазменной резки Kjellbreg, вспомогательная оснастка и инструменты. Предложена новая экспериментальная система управления производством пружин.

Представлен разработанный алгоритм адаптивного управления процессом обработки торцов крупногабаритных пружин методом плазменной резки с учетом индивидуальных геометрических характеристик обрабатываемых изделий. Разработан измерительный стенд, схемы замера заготовки и программа обработки результатов измерений. Получены экспериментальные данные отклонения поверхности обработанного торца пружины от плоскости перпендикулярной оси пружины при постоянных значениях параметров процесса плазменной резки. Выявлены факторы, определяющие необходимость индивидуального подхода к обработке торцов пружины. Сформулированы требования к исходным данным обрабатываемых изделий. Представлена закономерность изменения значений технологических параметров процесса плазменной резки от геометрических характеристик обрабатываемых изделий. Предложен быстрый табличный способ расчета тока реза – значимого технологического параметра. Разработана программная реализация алгоритма адаптивного управления процессом обработки на языке высокого уровня VisualStudioC++. Проведен анализ полученных результатов тестирования и отладки. Сформулированы выводы.

Ключевые слова: адаптивное управление, плазменная резка, крупногабаритная пружина.

Введение

Ежегодное увеличение объемов грузовых и пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте, а также общая глобализация рынка предопределяют причины создания новых инновационных грузовых и пассажирских вагонов: с повышенной грузоподъемностью, увеличенной скоростью передвижения, расширенного температурного диапазона эксплуатации и более длительным сроком работы. В свою очередь это предъявляет дополнительные требования к качеству изготовления узлов и деталей подвижного состава, одним из которых является крупногабаритная пружина, выполненная в соответствии с ГОСТ 13764–86 и ГОСТ 1452–2011. Потребность изделий данного типа составляет более одного миллиона штук в год. Одной из технологических операций при производстве пружин является обработка торцов пружин методом плазменной резки [1]. Большие объемы производства требуют автоматизации процесса производства.

Целью настоящей работы является разработка системы управления процессом обработки

крупногабаритных пружин методом плазменной резки с применением разработанного адаптивного алгоритма, что позволит повысить качество обрабатываемых изделий на технологической операции «Обработка торцов пружин методом плазменной резки».

Автоматизация обработки торцов пружин методом плазменной резки

Метод плазменной резки был разработан в конце двадцатого столетия. Пионерами в этой области по праву можно считать компании *Hypertherm* (США) и *Kjellberg* (Германия). Метод основан на обработке материалов, исключительно токопроводящих, плазменной дугой. Большее распространение плазменная резка получила при раскрое листовых металлов. Основным преимуществом плазменной резки по сравнению с традиционными механическими видами обработки (фрезерование, пиление), а также новыми альтернативными (лазерная резка, гидроабразивная, электроэрозионная обработка) является на порядок более высокая скорость реза при толщинах обрабатываемого металла от 25 до 100 мм [2, 3], при этом мощность плаз-

менной дуги в зоне обработки составляет до 43 кВт (на примере оборудования Hi-Focus 360 производителя Kjellberg), а температура достигает десятки тысяч градусов. Также данному методу присущ и ряд недостатков, одним из основных которых является изменение структуры обрабатываемого материала в зоне резки, связанное с воздействием высокой температуры.

Использование метода плазменной резки для обработки торцов крупногабаритных пружин одной из первых применила компания ООО «НПЦ «Пружина». Для этой цели было разработано и изготовлено автоматизированное производство, включающее промышленный робот манипулятор *Kawasaki*, оборудование плазменной резки *Kjellberg*, поворотный стол и вспомогательную оснастку. Состав автоматизированного производства и диаграмма его работы представлены в более ранних публикациях автора [4, 5].

В ходе эксплуатации данного автоматизированного производства были выявлены факторы, оказывающие негативное влияние как на обрабатываемое изделие, так и на работу оборудования. В данной работе рассматривается один из выявленных факторов – резка торцов при постоянных значениях технологических параметров процесса плазменной резки, что послужило основой для разработки алгоритма адаптивного управления процессом обработки методом плазменной резки.

Следует отметить, что отечественные научные школы применяют в сварочном производстве как универсальные траектории движения инструмента, так и разработанное программное обеспечение [6, 7].

Основные технологические параметры процесса плазменной резки для низкоуглеродистой стали толщиной 25 мм представлены в табл. 1.

В результате анализа типов и значений технологических параметров, в том числе и для обрабатываемых материалов с другими характеристиками, а также проведенных экспериментальных исследований, выявлена зависимость

скорости и тока реза от значения толщины обрабатываемого изделия, а именно при постоянном токе реза можно обрабатывать изделия разной толщины – изменяя скорость перемещения режущего инструмента, а также при постоянной скорости изменяя значение тока реза.

Следует отметить, что в процессе плазменной резки происходит термическое удаление металла, вследствие чего мы получаем рез определенной ширины, значение которого зависит от скорости и тока реза. Типы используемых газов и рабочее давление выбираются в зависимости от марки стали обрабатываемого изделия и требуемых характеристик обработанных поверхностей (при необходимости), но в случае обработки торцов это обязательно.

Следует отметить еще одну характеристику процесса плазменной резки, имеющей большое значение в случае обработки торцов пружин, – ширина реза, а именно не его значение по величине, а его постоянное значение. При обработке, к примеру, листовой стали, при постоянных значениях толщины обрабатываемого материала и значений технологических параметров процесса плазменной резки значение ширины реза будет иметь постоянную величину, но само значение будет зависеть от параметров скорости реза и тока реза.

При разной толщине, но постоянных значениях скорости реза и тока реза значение ширины будет различным, при этом чем меньше толщина обрабатываемого изделия, тем больше значение ширины реза, что подтверждено более ранними публикациями автора. Также данный факт подтвержден экспериментально данными, полученными в процессе измерения десяти опорных торцов пяти пружин, представленными на рис. 1.

При рассмотрении представленной на рис. 2 поверхности обработанного торца пружины, где заштрихованной выделена обработанная ее часть, установлено, что обработка производится при изменяемой толщине.

Таблица 1. Основные параметры процесса плазменной резки

Table 1. Basic parameters of the plasma cutting process

№	Наименование	Значение	Ед. изм.
1	Скорость реза	1700–2400	мм/мин
2	Ток реза	360	ампер
3	Давление плазмогаза 1 (воздух)	8	бар
4	Давление плазмогаза 2 (кислород)	8	бар
5	Давление вихревого газа (воздух)	6	бар

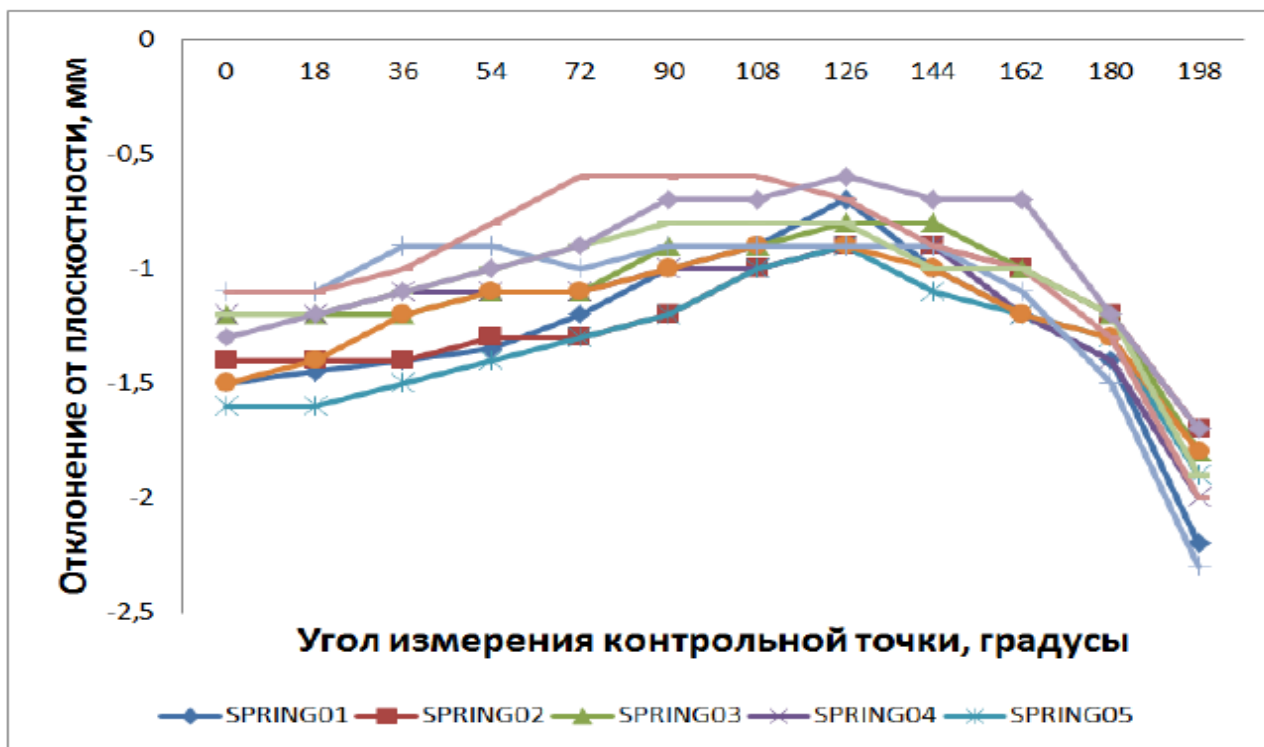


Рис. 1. Отклонение поверхности обработанного торца пружины от плоскости перпендикулярной оси пружины при постоянных значениях параметров процесса плазменной резки при обработке

Fig. 1. Deviation of the surface of the machined end of the spring, from the plane perpendicular to the axis of the spring, at constant values of the parameters of the plasma cutting process during processing

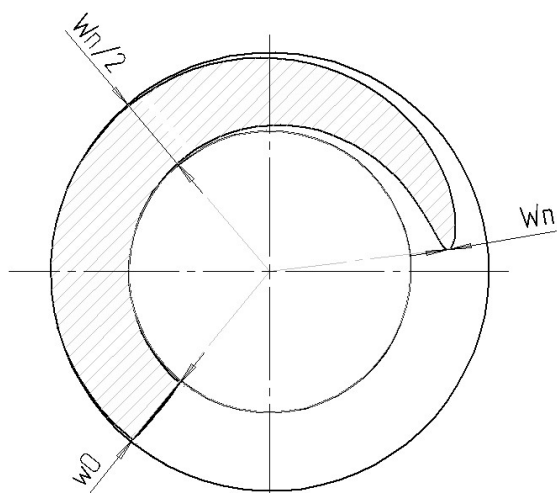


Рис. 2. Обработанная поверхность опорного торца пружины

Fig. 2. The machined surface of the spring seat

Представленные данные на рис. 1 и 2 подтверждают зависимость реза от толщины обрабатываемого материала. Соответственно, управляя параметрами процесса плазменной резки, в зависимости от толщины обрабатываемого материала, возможно обеспечить постоянную ширину реза и, как следствие, снижение времени обработки торца пружины на следующей опе-

рации. Для реализации данной возможности поставлена задача: разработать адаптивный алгоритм управления процессом плазменной резки торцов крупногабаритных пружин методом плазменной резки. Основной результат, который необходимо достигнуть при адаптивном управлении процессом обработки, это обеспечение постоянной ширины реза при обработке торца пружины. Перпендикулярность обработанной поверхности оси пружины при этом обеспечивается перемещением режущего инструмента роботом манипулятором и при разработке алгоритма не учитывается, т. к. не оказывает влияние на ширину реза.

При рассмотрении аналогичных задач управления процессом обработки изделий механическим способом в основном используется обратная связь по управлению режимами обработки в зависимости от состояния обрабатываемого объекта. К примеру, при шлифовании шейки коленчатого вала, используя активный контроль, измеряем значение диаметра шейки и по заданному закону обеспечиваем управление подачей шлифовального круга. В случае обработки пружины плазменной резкой автор (ы) не нашел решения по измерению ширины реза в месте обработки по следующим причинам:

температура в месте обработки достигает несколько тысяч градусов, что исключает применение различных датчиков для измерения линейных размеров, а воздушная среда в процессе реза содержит продукты процесса плазменной резки (частицы расплавленной и остывшей взвеси металла), что исключает применение, к примеру, оптических систем измерения.

Тем не менее обеспечение соответствия технологических параметров процесса плазменной резки толщине обрабатываемого материала (представлено на рисунке) позволит обеспечить постоянное значение ширины реза при обработке опорного торца пружины. При этом значение тока реза задается в соответствии с $I_n = f(W_n)$, где W_n – значение толщины в точке n , в которой производится обработка в текущий момент времени.

В результате анализа процесса обработки торцов пружин разработана структурная схема управления элементами автоматизированного производства, представленная на рис. 3.

Обработка торцов пружин обеспечивается комплексом оборудования в составе: промышленный робот – манипулятор *Kawasaki*, оборудование плазменной резки *Kjellbreg*, вспомогательная оснастка и инструменты, управление которыми обеспечивает экспериментальная система управления [8–11].

Работа системы управления основана на применении программного обеспечения, включающего в себя две подпрограммы: подпрограмма расчета координат данных, включая координаты точек траектории перемещения режущего инструмента (для СУ робота-манипулятора), таблицы значений технологических параметров процесса плазменной резки и отбраковки несоответствующей продукции и подпрограмма управления процессом обработки торцов пружин. Алгоритмы работы, на основе которых созданы данные подпрограммы, представлены на рис. 4 и 5 соответственно [12–15].

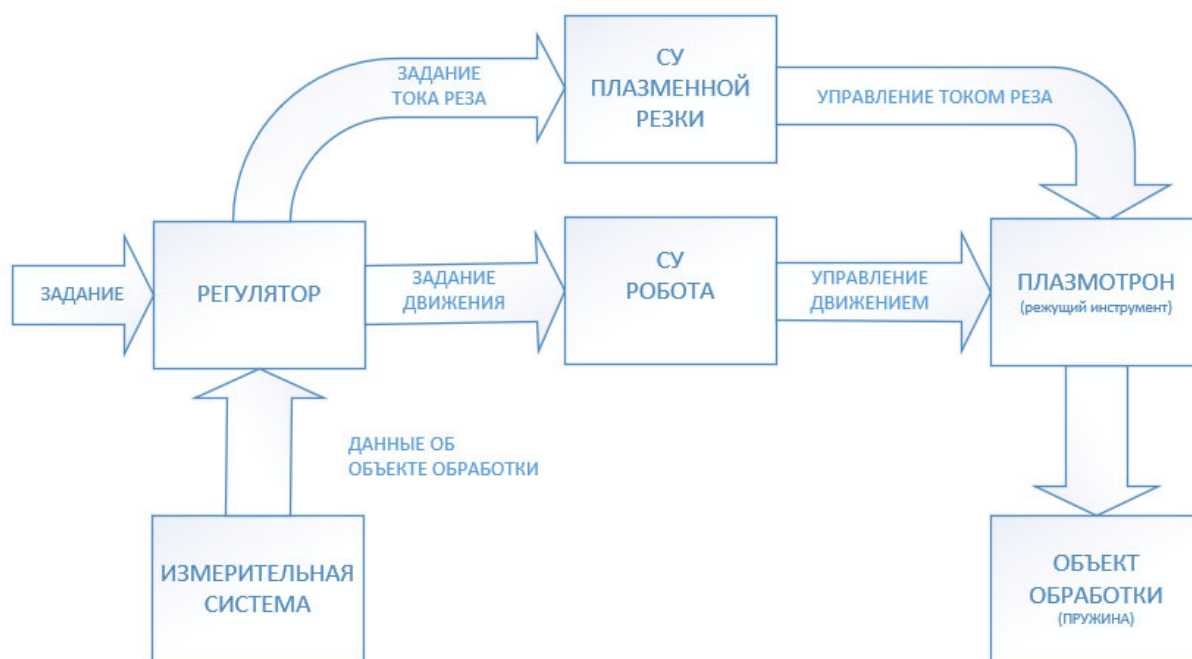


Рис. 3. Структурная схема управления автоматизированным производством

Fig. 3. Block diagram of automated production control

Подпрограмма расчета данных реализована на C++, работоспособность проверена практическим путем, отмечена сходимость результатов. Порядок проведения работоспособности.

Получены исходные данные геометрических характеристик первых опорных торцов трех пружин, включая одну забракованную при по-

мощи измерительной установки. Для визуализации данные представлены в графическом виде на рис. 6. Также на рисунке представлены границы допусков на изготовление пружины в соответствии со значениями, заданными НТД, и также в качестве исходных данных в разработанном программном обеспечении.

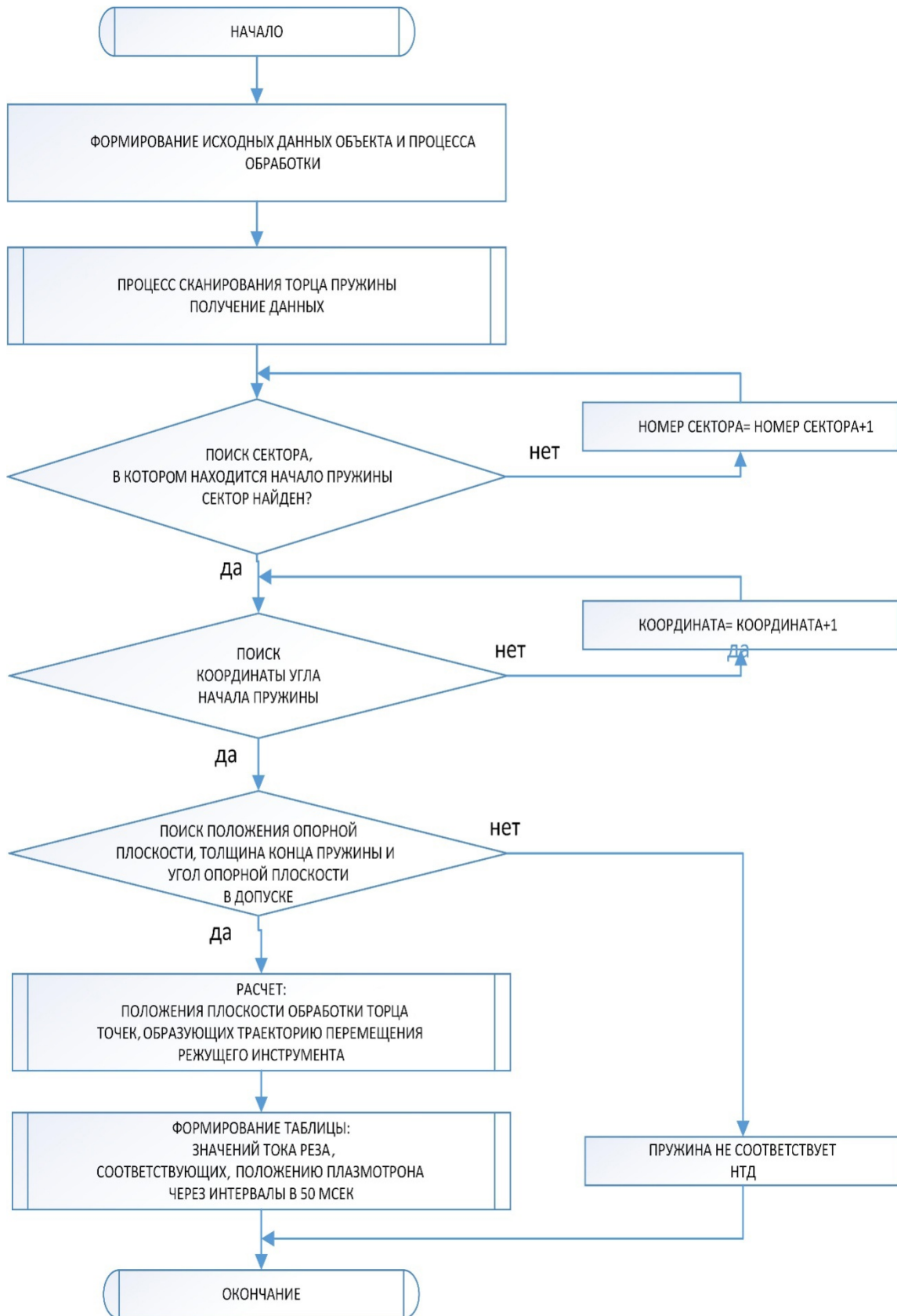


Рис. 4. Алгоритм расчета данных

Fig. 4. Data calculation algorithm

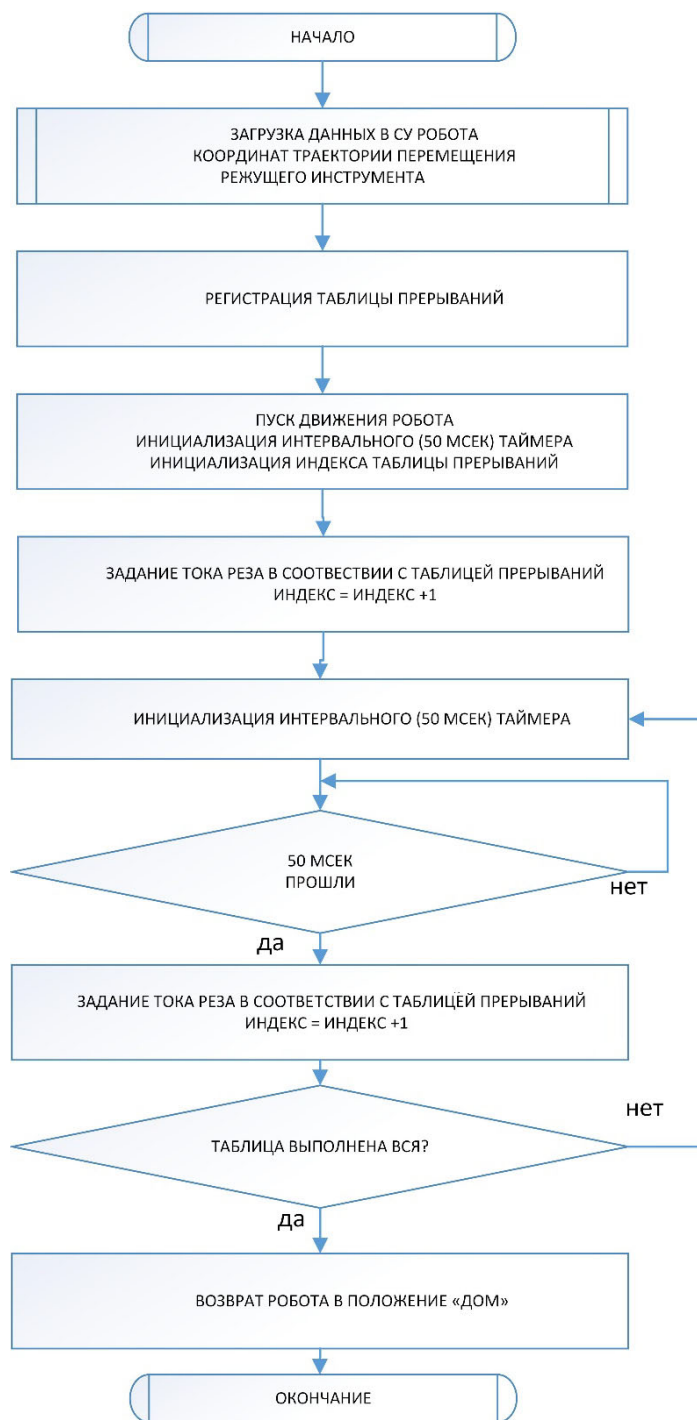


Рис. 5. Алгоритм управления процессом обработки торцов пружин
 Fig. 5. Algorithm for controlling the process of processing the ends of springs

Полученные данные, описывающие геометрическую характеристику, по каждой пружине были обработаны подпрограммой расчета данных, результаты представлены в табл. 2. В табл.

3 в качестве примера представлены рассчитанные данные для первого опорного торца пружины № 1 с технологическими параметрами для подпрограммы обработки торцов.

Таблица 2. Результаты измерений геометрических характеристик и технологические параметры обработки опорных торцов пружин

Table 2. The results of measurements of the geometric characteristics and technological parameters of the processing of the supporting ends of the springs

Наименование	Ед. изм.	Значение		
Характеристики пружины				
Тип пружины		№ 003	№ 003	№ 003
Порядковый номер испытуемой пружины		1	2	3
Диаметр пружины, мм		140	140	140
Диаметр прутка пружины, мм		25	25	25
Допуски на изготовление пружины				
Угол минимальный опорной поверхности пружины (обработанной)	градус	252	252	252
Угол максимальный опорной поверхности пружины (обработанной)	градус	288	288	288
Толщина опорного конца, минимальная	мм	5,3	5,3	5,3
Толщина опорного конца, максимальная, мм	мм	8,3	8,3	8,3
Технологические параметры процесса измерения:				
Количество точек на средней линии окружности пружины при сканировании с низким разрешением		30	30	30
Количество точек сектора пружины при сканировании с высоким разрешением	точки	15	15	15
Технологические параметры процесса плазменной резки				
Скорость реза	мм/МИН	1700	1700	1700
Рабочее расстояние плазматрона	мм	2,5	2,5	2,5
Толщина зоны термовлияния	мм	1,5	1,5	1,5
Ширина реза	мм	4,1	4,1	4,1
Полученные результаты				
Соответствие пружины НТД		Годная	Годная	Брак
Положение плоскости траектории реза	мм	-13,8	-14,9	X
Координата угла начальной точки траектории реза	градус	52,0	50,4	X
Координата угла средней точки траектории реза	градус	162,1	152,0	X
Координата угла конечной точки траектории реза	градус	272,2	253,5	X
Угол обработанной поверхности (после шлифовки) пружины	градус	252,0	252,0	X
Положение плоскости обр. поверхности пружины	мм	-17,3	-8,5	X

Таблица 3. Таблица с полученными технологическими данными

Table 3. Table with obtained technological data

№ п/п	Угол, градус	Измеренное расстояние, мм	Значение толщ. обработки, мм	Значение тока реза, А
1	50,4	-25,00	24,52	351
2	51,5	-25,07	24,54	353
...
40	94,1	-27,22	25,00	379
41	95,2	-27,30	25,00	379
...
100	161,2	-32,68	22,70	293
101	162,4	-32,77	22,62	291
...
140	206,0	-36,25	17,74	234
141	207,1	-36,34	17,56	232
...
181	251,9	-39,81	3,57	75
182	253,0	-39,90	1,99	36
183	254,2	-40,04	0,00	0

Выводы и результаты

В результате проведенной работы подтверждено обоснование применения высокоэффективного метода обработки торцов пружин методом плазменной резки. Установлена необходимость управления параметрами процесса плазменной резки. Создана структурная схема системы управления элементами автоматизированного производства обработки торцов пружин. Разработаны алгоритмы работы подпрограмм расчета данных, необходимых для управления процессом обработки торцов пружин на основе их индивидуальных геометрических характеристик, в том числе с возможностью отбраковки не соответствующей НТД продукции до этапа обработки. Разработано и протестировано с получением положительных результатов программное обеспечение на основе разработанных алгоритмов. Положительные результаты экспериментальных исследований по обработке торцов пружин на основе данных, полученных с помощью разработанного программного обеспечения, представлены в ранних публикациях автора.

Библиографические ссылки

1. *Анахов С. В.* Принципы и методы проектирования в электроплазменных и сварочных технологиях : учеб. пособие / под ред. А. С. Боруховича. Екатеринбург : Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2014. 144 с. ISBN 978-5-8050-0531-3.
2. *Платов С. А., Турыгин Ю. В.* Исследование и повышение эффективности РТК подрезки торцов пружин // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием, Ижевск, 23–25 апреля 2013 года. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2013. С. 381–384. ISBN 978-5-7526-0603-8.
3. *Землянушнова Н. Ю., Тебенко Ю. М.* Анализ методов улучшения качества пружин // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2005. № 2. С. 20–26.
4. *Turygin Y., Platov S.* Railtruck Robotic Spring End Process Operating System: conference. Smolence: IEEEServiceCenter, 2014. P. 127–132.
5. *Турыгин Ю.В., Нистюк А. И., Платов С. А.* Разработка человеко-машинного интерфейса на базе рабочего места оператора роботизированного комплекса // Вестник ИжГТУ. 2018. № 4. С. 43–51.
6. *Фролов А. В., Кравченко А. С.* Разработка универсальной траектории перемещения сварочной горелки при автоматизированной сварке // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : материалы II Международной научно-практической конференции молодых ученых / редкол.: А. В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. Комсомольск-на-Амуре, 2022. С. 178–181.

7. *Фролов А. В., Комарова К. К.* Программирование перемещения сварочной горелки при автоматизированной сварке // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : материалы II Международной научно-практической конференции молодых ученых / редкол. : А. В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. Комсомольск-на-Амуре, 2022. С. 173–177.

8. *Кузнецова П. Е., Сафронов М. В., Максимов Н. В.* Проблемы автоматизации технологического процесса на промышленном предприятии // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики : в 3 т. Красноярск, 2022. С. 919–921.

9. Методы и алгоритмы планирования траекторий роботов манипуляторов для лазерной резки / М. М. Кожевников, О. А. Чумаков, В. М. Шеменков, И. Э. Илюшин // Вестник Белорусско-Российского университета. 2019. № 2 (63). С. 4–12.

10. Методика оптимального размещения роботов-манипуляторов в задачах автоматизированного проектирования / М. М. Кожевников, В. М. Шеменков, М. Н. Миронова, И. Э. Илюшин // Вестник Белорусско-Российского университета. 2022. № 3 (76). С. 42–51.

11. *Волков М. А., Постыляков А. Ю., Исаков Д. В.* Управление техническими и технологическими системами : учебное пособие для студентов / Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Нижнетагильский технологический институт (филиал). Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2019. 249 с. ISBN 978-5-9544-0103-5.

12. Алгоритмы. Теория и практическое применение / Род Стивенс. М. : Издательство «Э», 2016. 544 с.

13. Алгоритмы: разработка и применение. Классика Computers Science / пер. с англ. Е. Матвеева. СПб. : Питер, 2016. 800 с. : ил.

14. Управление электронными устройствами на C++. Разработка практических приложений / пер. с англ. И. В. Бакомчев. М. : ДМК Пресс, 2016. 442 с.

15. *Афанасьев А. А., Рыболовлев А. А., Рыжков А. П.* Цифровая обработка сигналов : учеб. пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М. : Горячая линия – Телеком, 2022. 370 с. ISBN 978-5-9912-0869-7.

References

1. *Anakhov S.V.* *Printsipy i metody proektirovaniya v elektroplazmennyykh i svarochnykh tekhnologiyakh* [Principles and methods of design in electroplasma and welding technologies]. Ekaterinburg: Publishing house Ros. state prof.-ped. un-ta, 2014. 144 p. (in Russ.). ISBN 978-5-8050-0531-3.
2. *Platov S.A., Turygin Yu.V.* *Issledovanie i povyshenie effektivnosti RTK podrezki tortsov pruzhin* [Research and improvement of the efficiency of RTC for trimming the ends of springs]. *Molodye uchenye – uskorenuyu nauchno-tekhnicheskogo progressa v XXI veke* [Proc. Young scientists - accelerating scientific and

technological progress in the 21st century]. Izhevsk, 2013. Pp. 381-384 (in Russ.). ISBN 978-5-7526-0603-8.

3. Zemlyanushnova N.Yu., Tebenko Yu.M. [Analysis of methods for improving the quality of springs]. Defense complex - scientific and technical progress of Russia. 2005. No. 2. Pp. 20-26 (in Russ.).

4. Turygin Y., Platov S. Railtruck Robotic Spring End Process Operating System: conference. Smolence: IEEE ServiceCenter, 2014, pp. 127-132.

5. Turygin Yu.V., Nistyuk A.I., Platov S.A. [Development of a human-machine interface based on the workplace of the operator of a robotic complex]. Bulletin of IzhGTU. 2018. No. 4. Pp. 43-51 (in Russ.).

6. Frolov A.V., Kravchenko A.S. *Razrabotka universal'noi traektorii peremeshcheniya svarchoi gorelki pri avtomatizirovannoi svarke* [Development of a universal trajectory for the movement of a welding torch in automated welding]. *Nauka, innovatsii i tekhnologii: ot idei k vnedreniyu : materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh* [Proc. Science, innovation and technology: from ideas to implementation. Materials of the II International scientific-practical conference of young scientists]. Komsomolsk-on-Amur, 2022, pp. 178-181 (in Russ.).

7. Frolov A.V., Komarova K.K. *Programmirovaniye peremeshcheniya svarchoi gorelki pri avtomatizirovannoi svarke* [Programming the movement of the welding torch during automated welding]. *Nauka, innovatsii i tekhnologii: ot idei k vnedreniyu : materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh* [Proc. Science, innovation and technology: from ideas to implementation. Materials of the II International scientific-practical conference of young scientists]. Komsomolsk-on-Amur, 2022, pp. 173-177 (in Russ.).

8. Kuznetsova P.E., Safronov M.V., Maksimov N.V. *Problemy avtomatizatsii tekhnologicheskogo protsessa na promyshlennom predpriyatii* [Problems of automation of the technological process at an industrial enterprise].

Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki : sbornik materialov VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi Dnyu kosmonavtiki [Proc. Actual problems of aviation and space : collection of materials of the VIII International scientific and practical conference dedicated to the Day of Cosmonautics]: in 3 volumes. Krasnoyarsk, 2022. Pp. 919-921 (in Russ.).

9. Kozhevnikov M.M., Chumakov O.A., Shemenkov V.M., Ilyushin I.E. [Methods and algorithms for planning trajectories of robot manipulators for laser cutting]. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta*. 2019. No. 2, pp. 4-12 (in Russ.).

10. Kozhevnikov M. M., Shemenkov V. M., Mironova M. N., Ilyushin I. E. [Technique for optimal placement of robotic manipulators in computer-aided design problems]. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta*. 2022. No. 3. Pp. 42-51 (in Russ.).

11. Volkov M.A., Postylyakov A.Yu., Isakov D.V. *Upravlenie tekhnicheskimi i tekhnologicheskimi sistemami* [Management of technical and technological systems]. Nizhny Tagil Institute of Technology (branch). Nizhny Tagil: NTI (branch) UrFU, 2019. 249 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9544-0103-5.

12. Algorithms. Theory and practical application / Rod Stevens. Moscow: Publishing house "E", 2016. 544 p. (in Russ.).

13. Algorithms: development and application. Classics Computers Science / Per. from English. E. Matveeva. St. Petersburg: Peter, 2016. 800 p.: ill. (in Russ.).

14. *Upravlenie elektronnyimi ustroystvami na C++*. *Razrabotka prakticheskikh prilozhenii* [Managing electronic devices in C++. Development of practical applications]. Moscow: DMK Press, 2016. 442 p. (in Russ.).

15. Afanasiev A.A., Rybolovlev A.A., Ryzhkov A.P. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing: Textbook for universities], 2nd ed., corrected. and additional. Moscow: Hot line - Telecom. 2022, 370 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9912-0869-7.

Algorithm for Adaptive Control of Spring Endsprocessing by Plasma Cutting

S. A. Platov, LTD SPC Springs, Izhevsk, Russia

A. V. Shchenyatskiy, DSc. in Engineering, Professor, Head of the Department of Mechatronic Systems, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

A brief overview and issue general state of the demand and the need for the production of springs for the rolling stock of the RAO Russian Railways are given. Among the existing technological methods, plasma cutting was reasonably chosen and applied as a progressive machining method, as a means to increase the production output. General characteristics of this method as an alternative in the processing of metal products are presented. The existing solution of the plasma cutting method application for spring end processing is described. A new block diagram of automated production control for spring end processing by a set of equipment consisting of: Kawasaki industrial robotic arm, Kjellbreg plasma cutting equipment, auxiliary equipment and tools is presented. A new experimental control system for the spring production is proposed.

A well-developed algorithm for adaptive control of large-sized spring end processing by the plasma cutting method is presented, taking into account the individual geometric characteristics of the work pieces being processed. A measuring stand, billet measurement schemes and a program for processing measurement results have been developed. Experimental data of spring machined end surface deviation from the plane perpendicular to the spring axis, under constant parameters of the plasma cutting process are obtained. The factors stipulating the need for individual ap-

proach to the processing of spring ends are identified. The requirements for the initial data of processed products are formulated. The valuechangeregularity of technological parameters for plasma cutting due to workpiece geometric characteristics is presented. A fast tabular method for cutting current calculation as a significant technological parameter is proposed. A software implementation of the algorithm for adaptive control of the machining process in the high-level language Visual Studio C++ has been developed. The analysis of the obtained testing and debugging results is carried out. Conclusion sare for mulated.

Keywords: adaptive control, plasma cutting, large spring.

Получено: 14.04.23

Образец цитирования

Платов С. А., Щенятский А. В. Алгоритм адаптивного управления процессом обработки торцов пружин методом плазменной резки // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 3. С. 95–104. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-95-104.

For Citation

Platov S.A., Schenyatskyi A.V. [Algorithm for adaptive control of the process of processing the ends of springs by plasma cutting]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 95-104 DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-95-104.