УДК 621.791.01: 621.365.52 *DOI: 10.26731/1813-9108.2018.1(57).16-23*

В. С. Бычковский, Н. Г. Филиппенко, С. И. Попов, С. К. Каргапольцев

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация
Дата поступления: *16 января 2018 г.*

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОМБИНИРОВАННЫМ РОТАЦИОННЫМ РЕЗЦОМ СО СТРУЖКОЛОМОМ

Аннотация. *В работе представлены результаты исследований параметров ротационного точения сварных соединений с целью выявления оптимальных условий осуществления этого процесса. Разработана конструкция ротационного резца для токарно-абразивной обработки. Спроектированная технология ротационного резца для токарной обработки со стружкоделителем позволила изготовить и провести экспериментальные исследования режимов работы резца при токарной обработке сварных соединений в зависимости от угла наклона режущей пластины.*

Необходимо отметить, что вращение режущей пластины разработанной конструкции резца осуществляется за счет сил трения стружки о переднюю поверхность инструмента, а угол наклона режущей пластины изменяет направление действия этих сил. Результатами исследований стали в том числе рекомендации режимов промышленного использования резца. Определена эффективность разработанного ротационного резца для совмещенной токарно-абразивной обработки. Расчет силы резания производился в зависимости от площади сечения срезаемого слоя и удельной силы резания. Определение площади сечения срезаемого слоя выполнялось при помощи моделирования технологического процесса резания в программе Компас-3D версии 16 в подсистеме сборки. Проведенные аналитические и экспериментальные исследования позволили определить зависимости силы резания и шероховатости обработанной сварной поверхности ротационного точения от угла наклона режущей пластины, что позволяет проектировать и изготавливать ротационные резцы упрощенной конструкции. Заключительным этапом исследовательской работы стала оценка эффективности разработанного ротационного резца.

Ключевые слова: *ротационное точение, ротационный резец, токарно-абразивная обработка, режимы резанья, автоматизация, сварные соединения.*

V. S. Bychkovskii, N. G. Filippenko, S. I. Popov, S. K. Kargapol'tsev

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation
Received*: January 16, 2018*

THE STUDY OF THE PROPERTIES AND MACHINABILITY OF WELDED JOINTS BY A COMBINED ROTARY CUTTER WITH A CHIP BREAKER

Abstract. *The paper presents the results of studies of the parameters of rotary turning of welded joints in order to identify the optimal conditions for the implementation of this process. The design of a rotary cutter for turning and abrasive processing is developed. The designed technology of the rotary cutter for turning with a chip processor made it possible to produce and conduct experimental studies of the operating modes of the cutter for turning welded joints in accordance with the cutting plate inclination angle. It should be noted that the rotation of the cutting plate of the developed design of the cutter is carried out due to the friction forces of the chips on the front surface of the tool, and the angle of the cutting plate changes the direction of these forces. The results of this research included, among other things, the recommendations on the modes of industrial use of the cutter. The paper determines the efficiency of the developed rotary cutter for combined turning and abrasive processing. The cutting force was calculated depending on the cross-sectional area of the cut layer and the specific cutting force. The cross-sectional area of the shear layer was determined by simulating the technological process of cutting in the program Kompas-3D, version 16, in the assembly subsystem. Analytical and experimental studies made it possible to determine the dependence of the cutting force and roughness of the machined welded surface of the rotary turning on the cutting plate inclination angle, which allowed us to design and manufacture rotary cutters of a simplified construction. The final stage of the research was the evaluation of the effectiveness of the rotary cutter.*

Keywords: *rotational turning, rotary cutter, turning-abrasive processing, cutting regimes, automation, welded joint.*

Введение

Современное развитие механической обработки высокоскоростного резания сталкивается с рядом проблем, связанных с затратой большого количества времени на процесс наладки инструмента со сменной многогранной пластиной, а также режущий инструмент для высокоскоростной обработки должен иметь повышенную стойкость.

Один из перспективных способов обработки с незначительными затратами времени на наладку и повышенной стойкостью является ротационное точение. Необходимо отметить, что ротационное точение сварных соединений металлов способность снизить температуру нагрева в зоне резанья и на этой основе повысить режимы резания и сократить время обработки. Анализ проведенного

© В. С. Бычковский, Н. Г. Филиппенко, С. И. Попов, С. К. Каргапольцев, 2018

литературного обзора показал, что производительность обработки ротационными резцами в 2-4 раза выше, чем обычным инструментом, благодаря увеличению скорости и глубины резания. Это важно при применении инструмента на автоматизированных станках, а также при обработке труднообрабатываемых сталей и сплавов [1-4].

Постановка цели и задач исследования

В связи с вышеизложенным целью настоящей исследовательской работы стала разработка конструкции ротационного резца со стружколомом для токарно-абразивной обработки.

Достижение данной цели возможно при решении следующих задач:

– разработка конструкции ротационного резца токарно-абразивной обработки;

– проведение экспериментальных исследований работы экспериментально изготовленного ротационного резца для токарной обработки со стружкоделителем;

– разработка рекомендаций промышленного использования ротационного резца;

– определение эффективности разработанного ротационного резца для совмещенной токарно-абразивной обработки.

Разработка конструкции ротационного резца токарно-абразивной обработки

За основу конструкции разрабатываемого ротационного резца был принят резец, представленный в патенте No. 2187888 [5]. Конструкция ротационного резца включает в себя три основных элемента: режущую часть, подшипниковый узел, державку для установки и ориентации инструмента.

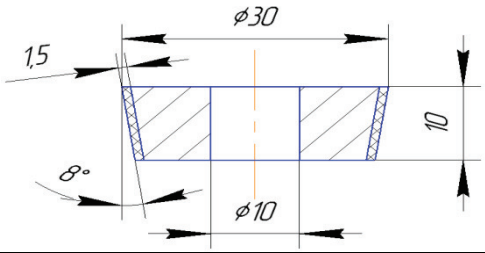
Как было определено в процессе работы, одной из проблем ротационного точения является образование сливной стружки [4]. Поэтому одной из подзадач была разработка конструкции режущей пластины. За основу конструкции стружколома была взята разработка, опубликованная в патенте No. 2187888 [6]. В качестве режущего материала пластины был выбран твердый сплав марки Т14К8.

Размеры и форма круглой твердосплавной пластины были подобраны по ГОСТ 19072-80. Конструкция и геометрические параметры пластины, представленны на рис. 1.

Необходимо отметить, что использование чашечных резцов позволяет производить чистовые обработки поверхностей и поэтому было принято решение об объединении операций точения и шлифования в конструкции комбинированного резца, что выгодно отличает его от других видов токарных резцов [5].

Форма абразивной пластины была принята аналогично режущей пластине, а для закрепления на ней абразивных зерен был выбран способ гальванической связки. В качестве абразивного зерна был выбран алмаз, но в процессе исследования мы столкнулись с существующими проблемами связки зерен, поэтому за основу технологии нанесения алмазного покрытия, был принят способ нанесения, разработанный во Всероссийском научно-исследовательском институте природных, синтетических алмазов и инструментов [7].

Разработанная конструкция абразивной пластины, состава и способа покрытия абразивного материала представлена на рис. 2.



Шлиф алмазный порошок	Зернистость	Концентрация, %	Связка	Скорость инструмента, м/с
АС10-Н	250/200	50	гальваническая, М2-02	12…20

Рис. 2. Абразивная пластина

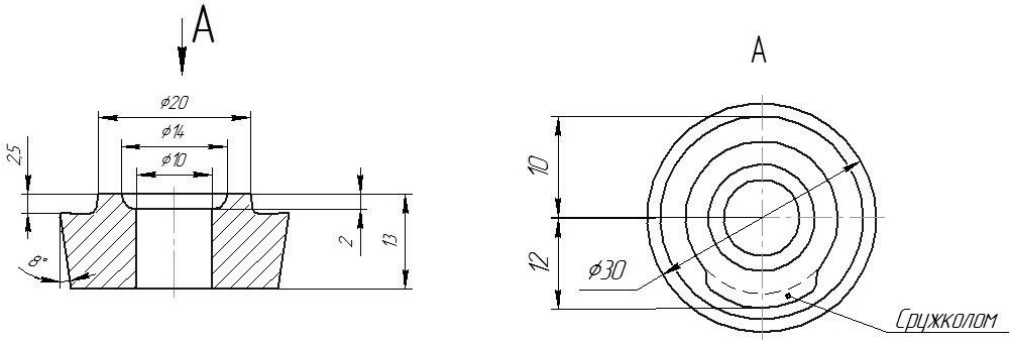


Рис. 1. Режущая пластина

Общеизвестной проблемой существующих конструкций ротационных резцов является биение в подшипниках качения, что отрицательно сказывается на качестве обработки. Более того, необходимо отметить, что подшипники качения восприимчивы к ударным нагрузкам. Устранение данных недостатков возможно при замене подшипника качения подшипником скольжения, что и было принято в качестве решения в рамках настоящего исследования. Исходя из расчёта давления, оказываемого на подшипник, материалом втулки была выбрана алюминиевая бронза БрМЖЦ10.

Проблема быстрого износа подшипников скольжения, работающих в условиях с обедненной смазкой и возможностью попадания различных частиц (стружки) в зону контакта, была решена разработкой технологии термической обработки бронзовых втулок. За основу был взят порядок термической обработки алюминиевых бронз. Способ включал отжиг, закалку и отпуск [8], что позволило увеличить срок эксплуатации ротационного резца на 20-30 %.

Конструкция присоединительной части ротационного резца была разработана как сборочная единица, состоящая из державки и вилки, представленной на рис. 3. Подвижная вилка позволяет изменять угол наклона режущей пластины и фиксировать его винтом-зажимом. Материал державки и вилки был выбран по рекомендации ГОСТ 5688-61. Размер оптимального сечения был принят, исходя из классического расчета на прочность.

Разработка и изготовление ротационного резца для токарной обработки со стружкоделителем

В связи со сложностью изготовления разработанной конструкции резца для токарно-абразивной обработки было принято решение изготовить опытный образец резца упрощенной модели для проведения экспериментальных исследований параметров ротационного точения.

В связи со сложностью изготовления режущей пластины со стружколомом была разработана пластина со стружкоделителем. Разработанный и изготовленный резец представлен на рис. 4.

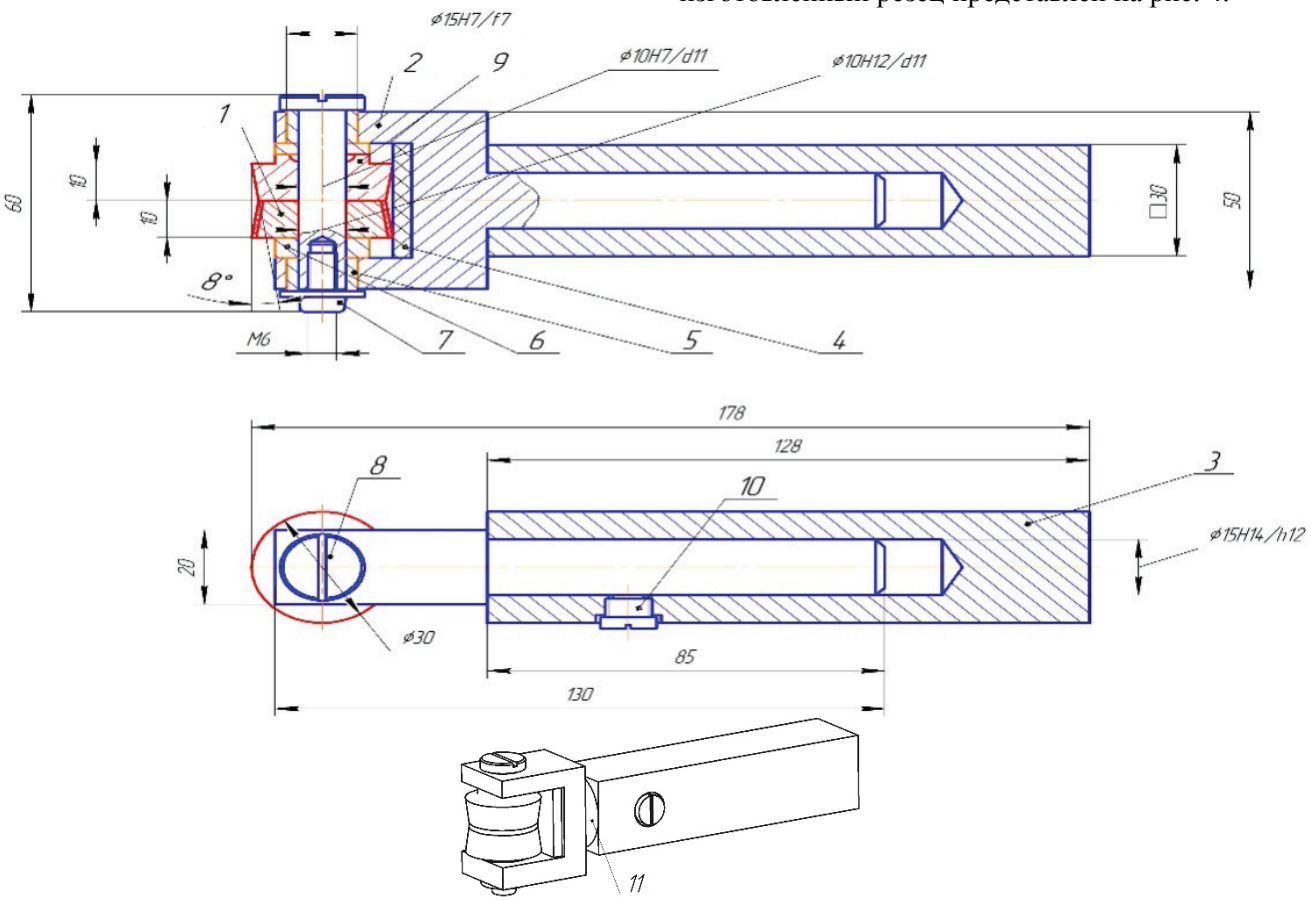


Рис. 3. Ротационный резец для токарно-абразивной обработки:
1 – режущий элемент; 2 – вилка; 3 – державка; 4 – войлочная прокладка; 5 – бронзовые втулки; 6 – бронзовые шайбы; 7 – винт крепежный; 8 – ось; 9 – твердосплавная пластина; 10 – винт фиксирующий; 11 – участок державки для контроля угла наклона

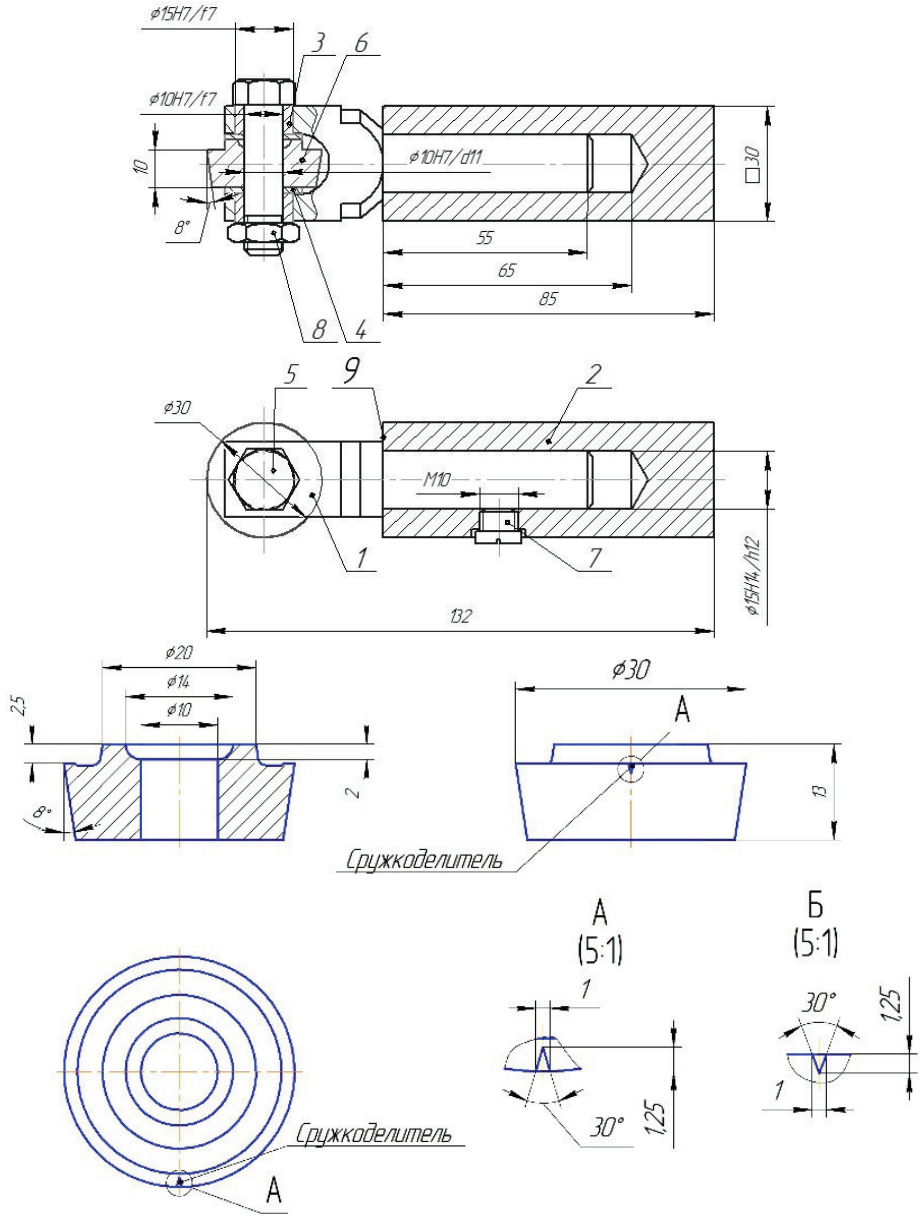


Рис. 4. Ротационный резец со стружкоделителем:
1 – вилка; 2 – державка; 3 – бронзовые втулки; 4 – бронзовые шайбы; 5 – ось; 6 – твердосплавная пластина; 7 – фиксирующий винт; 8 – гайка; 9 – участок державки для контроля угла наклона

Проведение экспериментальных исследований работы ротационного резца для токарной обработки со стружкоделителем

Дальнейшая работа была направлена на проведение аналитических и экспериментальных исследований по изучению параметров ротационного точения в зависимости от угла поворота режущей пластины, а именно определению величины силы резания и шероховатости обрабатываемой поверхности.

Расчет силы резания производился в зависимости от площади сечения срезаемого слоя и удельной силы резания [9].

Определение площади сечения срезаемого слоя выполнялось при помощи моделирования технологического процесса резания в программе Компас-3D версии 16 в подсистеме сборки.

В качестве исходных данных были приняты следующие параметры: диаметр и материал заготовки Д16Т, 60 мм; подача, 0,7 мм/об; глубина резания, 0,5…5 мм; угол наклона режущей пластины (λ), 0…90°.

На рис. 5 представлены экспериментально полученные зависимости силы резания от угла наклона режущей пластины, при глубине резания 0,5 мм и 2,5 мм.

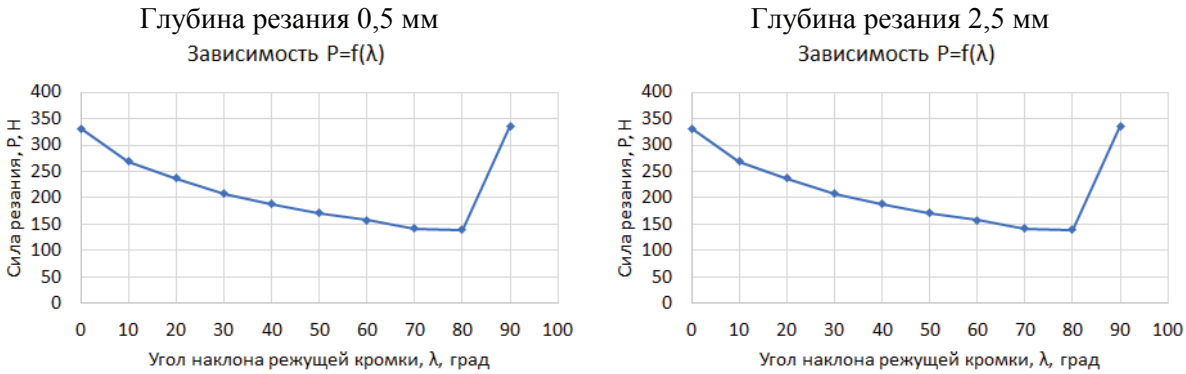


Рис. 5. Графики зависимости силы резания от угла наклона режущей пластины

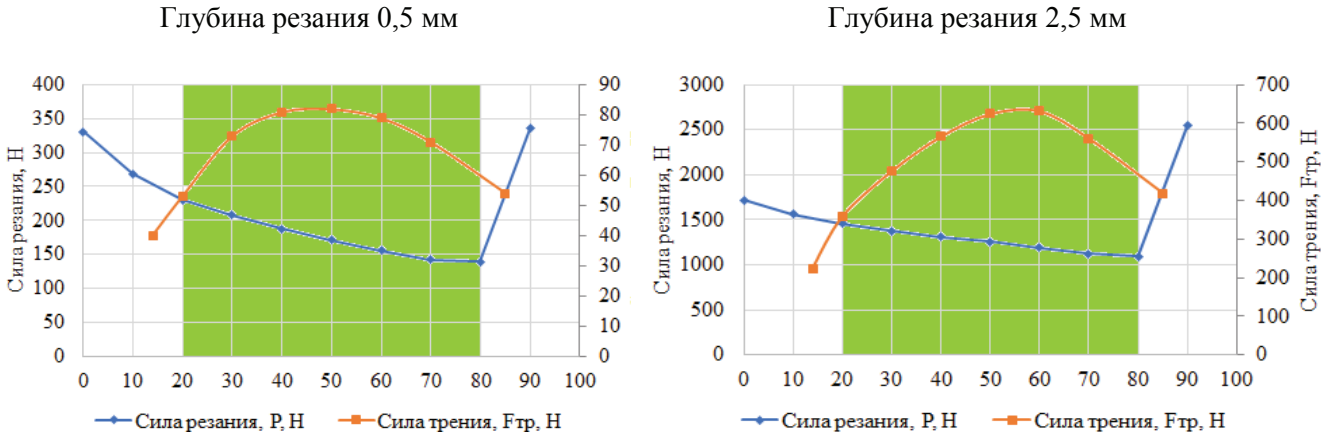


Рис. 6. Расчет силы трения из уравнения состояния равновесия трения скольжения

Анализ полученных данных показал, что по мере *увеличения* угла наклона режущей пластины примерно до 80º *уменьшается* сила резания, а при углах наклона больше 80º сила резания резко *увеличивается*, что объясняется геометрической особенностью режущей пластины.

При угле наклона режущей пластины, равном 90º резание становится невозможным.

Увеличение угла наклона режущей кромки больше 90º приведет к замене передней поверхности режущей пластины задней поверхностью инструмента, что также не совместимо с процессом резания.

Необходимо отметить, что вращение режущей пластины разработанной конструкции резца осуществляется за счет сил трения стружки о переднюю поверхность инструмента, а угол наклона режущей пластины изменяет направление действия этих сил.

Исходя из этого были определены граничные значения угла наклона режущей пластины (λ), при котором возможна ее ротация (λ в интервале от 14° до 85°). Также было определено, что вращение осуществляется, когда сила трения стружки о переднюю поверхность режущей пластины превышает силы трения в подшипниковом узле.

Далее был произведен расчет сил трения стружки о переднюю поверхность пластины в зависимости от угла ее наклона. Результаты расчета представлены на рис. 6.

Анализ данных показал, что наиболее оптимальным углом наклона режущей пластины (λ) будет угол в пределах 20…80° (выделен заливкой), так как силы резания при таком угле имеют наименьшее значение, а силы трения наибольшие.

Таким образом, в рамках настоящей работы было определено, что независимо от глубины резания диапазон оптимального угла наклона остается неизменённым.

Проведение экспериментальных исследований работы ротационного резца для токарной обработки со стружкоделителем

Натурные экспериментальные исследования работы ротационного резца проводились при обработке материала заготовки Д16Т на токарно-винторезном станке типа 1К62.

Резец устанавливался в резцодержатель с совмещением оси вращения заготовки с передней поверхностью пластины при помощи регулировочных пластин. Установка резца представлена на рис. 7.

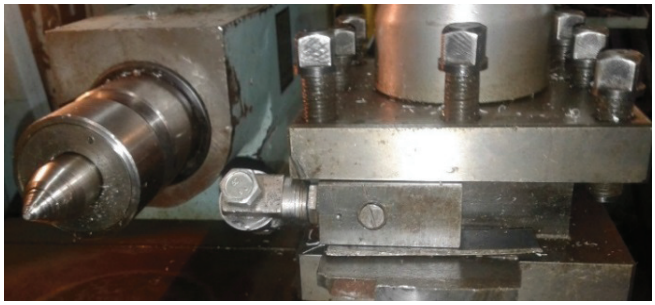


Рис. 7. Установка ротационного резца

Процесс обработки проводился с изменением угла наклона режущей пластины. Шероховатость определялась методом ВИК, и ее зависимость от угла наклона пластины представлена на рис. 8.

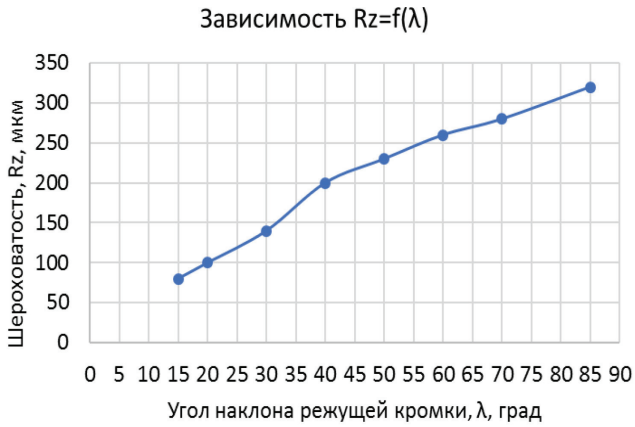


Рис. 8. Зависимость чистоты обработки от угла наклона режущей пластины

Анализ результатов проведенного эксперимента позволил сделать вывод, что по мере увеличения угла наклона режущей пластины шероховатость обработанной поверхности увеличивается практически линейно.

Разработка рекомендаций промышленного использования ротационного резца

Таким образом, проведенные аналитические и экспериментальные исследования позволили определить зависимости силы резания и шероховатости обработанной поверхности ротационного точения от угла наклона режущей пластины, что позволяет проектировать и изготавливать ротационные резцы упрощенной конструкции (без вращающейся вилки) с оптимальным углом наклона режущей пластины.

Данные рекомендации промышленного использования ротационного точения представлены на рис. 9, где заливкой показан интервал значений оптимального угла наклона режущей пластины (30…70°).

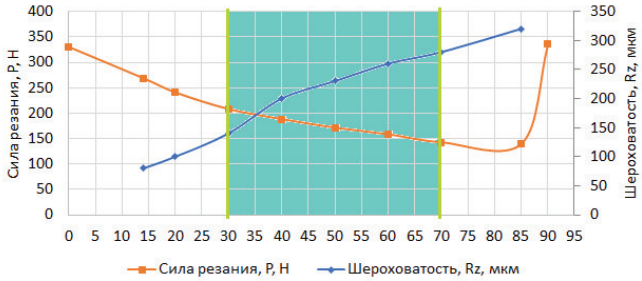


Рис. 9. Диапазон оптимального угла наклона режущей пластины

Обоснование эффективности разработанного ротационного резца для совмещенной токарно-абразивной обработки

Заключительным этапом исследовательской работы стала оценка эффективности разработанного ротационного резца по выбранным критериям, а именно:

- по стойкости ротационного резца, которая заключалась в следующем: особенность ротационного точения является снижение относительного скольжения в контакте инструмента с деталью, а участки режущей кромки только периодически участвуют в съеме припуска с заготовки. Отсюда следует, что значительно (на порядок) снижается температура в зоне резания, а стойкость инструмента увеличивается. График распределения температуры вдоль развернутой режущей кромки ротационного резца представлен на рис. 10 и доказывает вышесказанное [10, 11];

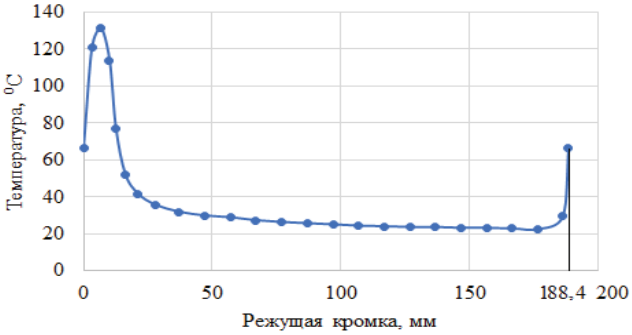


Рис. 10. График распределения температуры вдоль режущей кромки ротационного резца

- снижение сил резания возможно, и это было доказано аналитически, при подборе оптимального угла наклона режущей пластины;

- снижение шероховатости, доказанное экспериментально, за счет подбора оптимального угла наклона режущей пластины и использования конструкции ротационного резца с абразивной пластиной.

Таким образом, доказанная эффективность использования ротационного резца позволила сде-

лать вывод о его востребованности в промышленном производстве.

Заключение

Итогами выполненной работы стали:

- разработанные конструкции ротационного резца для токарно-абразивной обработки;
- экспериментальные исследования с использованием разработанной конструкции ротационного резца со стружкоделителем;
- полученные параметры ротационного точения и выявленные зависимости силы резания и шероховатости обрабатываемой поверхности в зависимости от угла наклона режущей пластины;
- разработанные рекомендации по режимам обработки, позволяющие сократить процент брака (по шероховатости) и уменьшить силы резания;
- обоснованные критерии эффективности использования разработанного ротационного резца для токарно-абразивной обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ротационное резание материалов / Ящерицын П.И., Борисенко А.В. и др. Минск : Наука техника, 1987. 229 с.
2. Коновалов Е.Г., Сидоренко В.А., Соусь А.В. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов. Минск : Наука и техника 1972. 272 с.
3 Гик Л.А. Принципы создания и классификации схем ротационного резания // СТИН. 2005. No. 7. С. 25–28.
4. Бинчуров А.С. Технологическое обеспечение повышения производительности и качества обработки поверхностей методом ротационного точения многогранными резцами : дис. … канд. техн. наук. Томск, 2017.
5. Способ совмещенной токарно-абразивно-алмазной обработки : пат. 2187888 Рос. Федерация. No. 2000131736/09 ; заявл. 18.12.08; опубл. 20.08.10, Бюл. No. 23 (II ч.). 5 с.
6. Режущая пластина для обработки колесных пар : пат. 2187888 Рос. Федерация. No. 2000131736/09; заявл. 18.12.08; опубл. 20.08.10, Бюл. No. 23 (II ч.). 5 с.
7. Способ изготовления алмазного инструмента на гальванической связке : пат. 2013125280/02 Рос. Федерация. No. 2016128166; заявл. 31.05.2013; опубл. 27.07.2014. Бюл. No. 21. 7 с.
8. Способ термической обработки алюминиевых бронз : пат. 2013463 Рос. Федерация. No. 2000131736/09; Заявл. 11.11.1991; Опубл. 12.12.1991, бюл. No. 23. 5 с.
9. Серебреницкий П.П. Краткий справочник технолога-машиностроителя. СПб. : Политехника, 2007. 951 с.
10. Yamamoto H. et al. Thermal Behavior and Chip formation on Rotary Cutting of Difficult-to-cut Materials Utilizing Multi Tasking Lathe and MQL // Proc. 5th nt. Conf. on LEM21. 2009. T. 661.
11. Dessoly V., Melkote S. N., Lescalier C. Modeling and verification of cutting tool temperatures in rotary tool turning of hardened steel //International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2004. T. 44. No. 14. C. 1463–1470.

REFERENCES

1. Yashcheritsyn P.I., Borisenko A.V. et al. Rotatsionnoe rezanie materialov [Rotational cutting of materials]. Minsk : Nauka i tekhnika Publ., 1987, 229 p.
2. Konovalov E.G., Sidorenko V.A., Sous' A.B. Progressivnye skhemy rotatsionnogo rezaniya metallov [Progressive schemes of rotational cutting of metals]. Minsk : Nauka i tekhnika Publ, 1972, 272 p.
3 Gik JI.A. Printsipy sozdaniya i klassifikatsii skhem rotatsionnogo rezaniya [Principles of creating and classifying rotary cutting schemes]. *STIN*, 2005, No. 7, pp. 25–28.
4. Binchurov A.S. Tekhnologicheskoe obespechenie povysheniya proizvoditel'nosti i kachestva obrabotki poverkhnostei metodom rotatsionnogo tocheniya mnogogrannymi reztsami : dis. … kand. tekhn. nauk [Technological support of increasing the productivity and quality of surface treatment by the method of rotational turning with polyhedral incisors: Ph.D. (Engineering) thesis]. Tomsk, 2017.
5. *Sposob sovmeshchennoi tokarno-abrazivno-almaznoi obrabotki* [*The method of combined turning abrasive-diamond processing*]: patent RF 2187888, No. 2000131736/09 ; applied Dec 18, 2008; publ. Aug 2010, Bull. No. 23 (II parts), 5 p.
6. *Rezhushchaya plastina dlya obrabotki kolesnykh par* [*Cutting plate for machining wheel pairs*] : patent RF 2187888, No. 2000131736/09; applied Dec 18, 2008; publ. Aug 20, 2010, Bull. No. 23 (II parts.), 5 p.
7. *Sposob izgotovleniya almaznogo instrumenta na gal'vanicheskoi svyazke* [*Method for manufacturing a diamond tool on a galvanic binder*] : patent RF 2013125280/02, No. 2016128166; applied May 31, 2013; publ. Jul 27, 2014, Bull. No. 21, 7 p.
8. *Sposob termicheskoi obrabotki alyuminievykh bronz* [*Method for the thermal treatment of aluminum bronzes*] : patent RF 2013463, No. 2000131736/09; applied Nov. 11, 1991; publ. Dec 12, 1991, Bull. No. 23, 5 p.
9. Serebrenitskii P.P. Kratkii spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya [A brief reference book of the technologist machine builder]. St.Peterburg: Politekhnika Publ., 2007, 951 p.
10. Yamamoto H. et al. Thermal Behavior and Chip formation on Rotary Cutting of Difficult-to-cut Materials Utilizing Multi Tasking Lathe and MQL. *Proc. 5th nt. Conf. on LEM21*, 2009, Vol. 661.
11. Dessoly V., Melkote S. N., Lescalier C. Modeling and verification of cutting tool temperatures in rotary tool turning of hardened steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004. Vol. 44, No. 14, pp. 1463–1470.

Информация об авторах

Бычковский Владимир Сергеевич – аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: bikovskii_vs@mail.ru

Филиппенко Николай Григорьевич - к. т. н., доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: pentagon@mail.ru

Попов Сергей Иванович - к. т. н., доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: popovs@irgups.ru

Каргапольцев Сергей Константинович - д. т. н., профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kck@irgups.ru

Authors

Vladimir Sergeevich Bychkovskii – Ph.D. student of the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: bikovskii_vs@mail.ru

Nikolay Grigoryevich Filipenko – Ph. D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: pentagon@mail.ru

Sergey Ivanovich Popov – Ph. D. in Engineering Science, Assoc. Prof. of the Subdepartment of Automation of Industrial Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: popovs@irgups.ru

Sergey Konstantinovich Kargapol'tsev – Doctor of Engineering Science, Prof. of the Subdepartment of Automation of Industrial Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kck@irgups.ru

Для цитирования

Бычковский В. С. Исследование свойств и обрабатываемости сварных соединений комбинированным ротационным резцом со стружколомом / В. С. Бычковский, Н. Г. Филиппенко, С. И. Попов, С. К. Каргапольцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2018. - Т. 57, №. 1. - С. 16–23. - DOI: 10.26731/1813-9108.2018.1(57).16-23

For citation

Bychkovskii V. S., Filippenko N. G., Popov S. I., Kargapol'tsev S. K. The study of the properties and machinability of welded joints by a combined rotary cutter with a chip breaker. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling,* 2018, Vol. 57, No. 1, pp. 16–23. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.1(57).16-23

УДК *669.71:502.3* ***DOI:*** *10.26731/1813-9108.2018.1(57).23-30*

К. С. Ёлкин [1]***, М. А. Глушкевич*** [2]***, С. А. Небогин*** [3]

[1] *ООО «Спецстройинвест», г. Иркутск, Российская Федерация*
[2] *ОАО «СибВАМИ», г. Иркутск, Российская Федерация*
[3] *Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация*

Дата поступления: *24 января 2018 г.*

ПРИМЕНЕНИЕ УСТАНОВОК ПРОДОЛЬНО-ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОЙ МОЩНОСТИ

Аннотация. *Увеличение мощности рудовосстановительных печей сопровождается значительным повышением величин рабочих токов в электродах при сравнительно медленном росте полезных напряжений, что приводит к резкому возрастанию индуктивной составляющей падения напряжения в электрической цепи печной установки, а следовательно, и понижению ее коэффициента мощности, который на сегодняшний день не превосходит величины 0,7. Невозможность снизить реактивное сопротивление печи печного контура приводит к уменьшению естественного коэффициента мощности рудовосстановительных печей по мере увеличения их мощности и вызывает необходимость применения установок продольно-емкостной компенсации. Применение продольной компенсации вызывает повышение напряжения на шинах потребителя, зависящее от тока нагрузки. Появляется падение напряжения в емкости, направленное противоположно падению напряжения в индуктивности. Значение емкостного сопротивления может быть подобрано таким образом, что модуль вектора вторичного напряжения будет равен первичному напряжению или больше его. При применении установок продольной компенсации возможно автоматическое регулирование напряжения во время изменения нагрузки потребителя. В статье описана возможность работы электропечи РКО-33 с коэффициентом мощности 0,92. Для достижения столь высокого мощностного коэффициента печи требуется частичная компенсация её индуктивного сопротивления посредством последовательного включения конденсаторных батарей УПК в фазы электрической цепи. Суммарная расчетная рабочая мощность конденсаторных батарей УПК определяется из баланса реактивной мощности электропечи.*

Ключевые слова: *производство кремния, электрод, рудовосстановительная электропечь, продольная компенсация реактивной мощности.*

© В. С. Бычковский, Н. Г. Филиппенко, С. И. Попов, С. К. Каргапольцев, 2018