

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.53078/20778481\_2023\_1\_4

УДК 621.923

*Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев*

### МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ ТОКАРНЫХ ОТРЕЗНЫХ ПЛАСТИНЧАТЫХ РЕЗЦОВ

*L. M. Akulovich, L. E. Sergeev*

### MAGNETIC ABRASIVE PROCESSING OF THE CUTTING PART OF LATHE CUT-OFF PLATE CUTTERS

#### Аннотация

Обоснована актуальность магнитно-абразивной обработки режущей части токарных отрезных пластинчатых резцов после их заточки. Моделированием топографии магнитного поля выявлена форма полюсных наконечников с наибольшей концентрацией магнитного потока. Экспериментально установлено, что после МАО резцов шероховатость поверхностей в зоне режущей кромки по параметру  $Ra$  не превышает 0,8 мкм, а радиус округления режущей кромки 0,02...0,03 мм.

#### Ключевые слова:

отрезные пластинчатые резцы, заточка резцов, алмазное шлифование, магнитно-абразивная обработка, ферроабразивный порошок, магнитное поле.

#### Для цитирования:

Акулович, Л. М. Магнитно-абразивная обработка режущей части токарных отрезных пластинчатых резцов / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 1 (78). – С. 4–12.

#### Abstract

The relevance of magnetic abrasive processing (MAP) of the cutting edge of lathe cut-off plate cutters after their sharpening is substantiated. Magnetic field topography modeling revealed the shape of pole pieces with the highest concentration of the magnetic flux. It was experimentally established that after subjecting cutters to the MAP, the surface roughness in the cutting edge zone by the parameter  $Ra$  does not exceed 0,8  $\mu\text{m}$  and the radius of cutting edge rounding is 0,02...0,03 mm.

#### Keywords:

cut-off plate cutters, cutter sharpening, diamond grinding, magnetic abrasive processing, ferroabrasive powder, magnetic field.

#### For citation:

Akulovich, L. M. Magnetic abrasive processing of the cutting part of lathe cut-off plate cutters / L. M. Akulovich, L. E. Sergeev // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 1 (78). – P. 4–12.

#### Введение

В машиностроении при изготовлении многих изделий для нефтегазовой, химической, строительной, пище-

вой и других отраслей используют трубный прокат в качестве исходных заготовок. Мерное разделение трубного проката по длине в зависимости от толщины стенки производят лазерной резкой,

ленточными пилами на ленточно-отрезных станках, дисковыми отрезными фрезами на пилоотрезных станках, отрезными пластинчатыми резцами на токарных станках, абразивными кругами на абразивно-отрезных станках [1]. Основные требования, предъявляемые к указанным способам резки трубного проката, включают минимальную ширину реза и максимальную производительность при соблюдении требований по качеству. Каждый способ резки, кроме достоинств, имеет свои недостатки и, соответственно, области применения. В частности, лазерная резка создает определенные экологические проблемы, обусловленные наличием отраженного лазерного излучения, импульсного шума и загрязнения воздуха в результате выделения вредных аэрозолей, газов и паров [2]. При отрезке труб на ленточно-отрезных станках возможно образование косо́го среза, заусенцев и рваных краев среза. Абразивно-отрезная резка

сопровождается загрязнением воздуха абразивными частицами [3]. Недостатками разделения трубного проката дисковыми отрезными фрезами на пилоотрезных станках являются большая (4...8 мм) ширина реза, высокая стоимость фрез и производственные сложности их заточки, связанные с необходимостью иметь для этого специальное оборудование.

В условиях серийных производств для резки трубного проката традиционно наиболее востребованы отрезные пластинчатые резцы, изготавливаемые из быстрорежущих сталей, которые, по сравнению с твердыми сплавами, менее чувствительны при работе в условиях прерывистого резания и ударных нагрузок. При работе отрезного резца большое влияние на напряженно-деформированное состояние срезаемого слоя и режущей части резца оказывает радиус округления режущей кромки  $r$  (рис. 1).

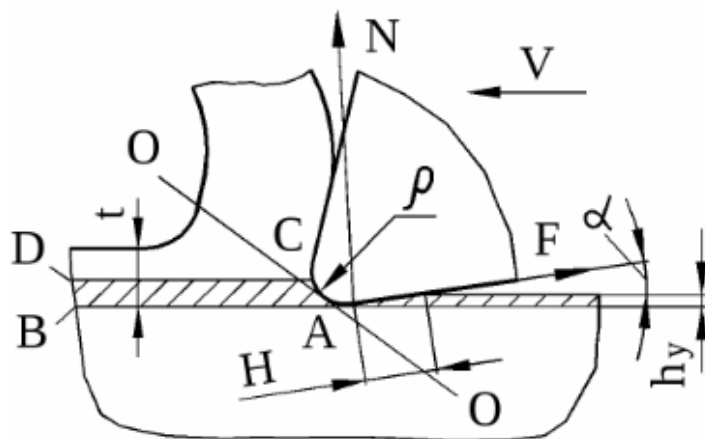


Рис. 1. Схема срезания стружки режущим лезвием отрезного резца

Износ резцов сопровождается увеличением радиуса округления режущей кромки как результат трения стружки и обрабатываемой поверхности по контактным площадкам передней и задней поверхностей и пластического деформирования материала инструмента под влиянием давления стружки и высокой

температуры в зоне резания. Для реализации нормального резания толщина  $t$  срезаемого слоя должна быть больше радиуса  $r$  округления режущей кромки. У нормально заточенных инструментов радиус округления режущей кромки составляет около 0,03 мм, а по мере затупления он увеличивается, становится

больше толщины срезаемого слоя. Вследствие этого величины радиальной силы  $N$  и силы трения  $F$  (см. рис. 1) резко возрастают, и процесс резания затрудняется.

Это приводит к появлению дополнительных погрешностей размеров из-за увеличения площадки износа по задней поверхности лезвия и последующего разрушения режущей кромки [4, 5]. При заточке резцов шероховатость передней, задней поверхностей и режущей кромки не должна превышать  $Ra = 0,4$  мкм [6]. Силовое механическое воздействие абразивного круга на поверхность резца при его заточке вызывает интенсивный нагрев локальных участков и высокий градиент температур, что является предпосылкой для формирования на обрабатываемой поверхности дефектного слоя, снижающего эксплуатационные свойства инструмента.

Проведенные исследования [6–9] показали, что на стойкость резцов оказывает влияние как величина радиуса округления режущих кромок, так и шероховатость передней и задней поверхностей режущего клина.

Таким образом, повышение качества заточки токарных отрезных пластинчатых резцов технологическими методами является актуальным.

Целью исследования является поиск технологических методов уменьшения шероховатости передней и задней поверхностей токарных отрезных пластинчатых резцов, а также обеспечения заданной величины радиуса округления режущих кромок.

### **Основная часть**

Операция заточки является заключительной при изготовлении токарных отрезных пластинчатых резцов и обязательной при потере ими режущих свойств. Выступы микронеровностей, образовавшиеся на режущих кромках резцов после заточки шлифовальными

кругами, разрушаются в первые секунды резания, а впадины микронеровностей остаются, являясь местом зарождения микротрещин. Качество заточки резца оценивают, в основном, по шероховатости его передней и задней поверхностей, а также по условному радиусу округления режущей кромки. При заточке инструментов алмазными кругами необходимо учитывать потерю режущей способности круга из-за засаливания рабочей поверхности и изменения ее рельефа [5], а также радиальное и торцевое биение периферии круга, которое образуется в результате износа и самозаточивания абразивных кругов. Биение круга приводит к возникновению прерывистого резания, которое особенно проявляется на последних проходах при заточке, когда глубина резания не превышает 5...10 мкм. Прерывистое резание при заточке создает в поверхностном слое резца градиент внутренних напряжений, что способствует возникновению сколов и трещин на лезвии резцов при их работе [7]. Поэтому при заточке алмазным кругом необходимо производить его периодическую правку для восстановления режущей способности. Биение рабочих поверхностей абразивных кругов после правки составляет 5...30 мкм, а при их длительной эксплуатации это биение может достигать 40 мкм [7].

Интенсивность изнашивания резца после заточки зависит от трения сходящей стружки по передней поверхности и трения задней поверхности по заготовке, что существенно влияет на величину силы резания. Снижение шероховатости передней и задней поверхностей резца обеспечивает уменьшение силы резания [9].

Проведенные исследования [9, 10] показали, что величина радиуса округления режущей кромки резца при заточке шлифовальным кругом колеблется в пределах 30 %, и это служит источником возникновения прерывистого резания. Поэтому рекомендуется после за-

точки шлифовальным кругом дополнительно проводить доводку мелкозернистым абразивом на притирах, например, из мелкозернистого серого чугуна с ферритной структурой (100...120 НВ), шаржированного порошком АСМ зернистостью 7/5...10/7, либо использовать высокоточные шлифовально-заточные станки, имеющие аэростатические опоры и встроенные синхронные безвибрационные электродвигатели [8].

Альтернативным вариантом решения проблемы может быть объемная абразивная обработка режущей части резцов [9]. К способам объемной абразивной обработки, обеспечивающим уменьшение высоты микронеровностей поверхностей режущей части резцов и формирующим радиус округления режущей кромки, относится обработка эластичным (гибким) инструментом, в том числе магнитно-абразивная обработка (МАО) [11]. Сущность способа МАО состоит в том, что обрабатываемую поверхность детали располагают с определенным зазором между полюсными наконечниками магнитной системы. Зазоры заполняют ферроабразивным порошком (ФАП), зерна которого под действием энергии магнитного поля (МП) удерживаются в зазоре и, ориентируясь наибольшей осью по направлению магнитных силовых линий, создают «ферроабразивную щетку» (ФАЩ), которая силой МП прижимается к обрабатываемой поверхности. Детали сообщают определенные кинематические движения (вращательные, возвратно-поступательные, осциллирующие), обеспечивающие перемещения обрабатываемой поверхности относительно ФАЩ. Для предотвращения засаливания ФАЩ в рабочие зазоры подается смазочно-охлаждающее технологическое средство (СОТС). Поскольку каждое зерно ФАП ориентируется по направлению магнитных силовых линий своей наибольшей осью, то к обрабатываемой поверхности всегда обращены наиболее острые режущие кромки. Вме-

сте с тем в процессе МАО режущие кромки зерен ФАП подвержены разрушению из-за их износа. Это приводит к переформированию прежней наибольшей оси в другом сечении зерна ФАП. Таким образом, происходит переориентация ферромагнитных зерен в процессе МАО, в результате чего обработка поверхности детали производится всегда наиболее острыми кромками.

При МАО срезаются вершины неровностей и образуется новая шероховатость поверхности, характеризующаяся малой высотой микронеровностей и увеличенным радиусом их округления. Топография поверхности в процессе МАО не сопровождается заметным изменением шага неровностей, образовавшихся на предшествующих операциях обработки.

Выполненные ранее исследования [5] показали, что МАО поверхностей рабочих элементов свёрл обеспечивает формирование радиусов округления режущих кромок величиной около 10,0 мкм и снижение шероховатости поверхностей рабочих элементов свёрл до величины параметра  $Ra = 0,18...0,20$  мкм при исходной шероховатости  $Ra = 0,35...0,40$  мкм.

Магнитное поле воздействует также на структуру и субструктуру материала [12]. В частности, в быстрорежущей стали после МАО происходит дробление зерна остаточного аустенита до 3 мкм (12...14 балл), что на два порядка ниже зерна аустенита исходной структуры этой стали. При воздействии магнитного поля с напряженностью в пределах  $(6...10) \cdot 10^5$  А/м наблюдалось повышение твердости на 1...3 ед. НРС на всей поверхности образца. И если ранее преобладало блочное выкрашивание режущих элементов, то после магнитной обработки уменьшилась величина сколов.

МАО обеспечивает более точное приближение формы кромки к дуге окружности, радиус которой не превышает 60 мкм в отличие от обработки

электрохимическим методом – 100 мкм и абразивной лентой – 150 мкм [13]. Такое приближение формы кромки к дуге окружности обусловлено концентрацией магнитного потока на локальном участке, что интенсифицирует сьем на нем металла [14].

Для реализации процесса резания при MAO одной из главных задач является формирование в рабочем зазоре ФАЩ из частиц ФАП. Исследование пространственного распределения МП в рабочем зазоре при MAO резцов проводили методом компьютерного моделирования с использованием программной среды FEMM [15] при заданных граничных условиях. Значения величин магнитной индукции в пространстве рабочего зазора при расположении в нем детали определяли по тарифовочной таблице программы FEMM.

Исследованы топографии МП для трех видов профиля торцевой поверхности полюсных наконечников: сферического, конического и плоского.

В зазоре, образованном полюсными наконечниками электромагнитов со сферической формой торцев (рис. 2), наблюдается достаточно равномерное распределение МП по границам рабочего зазора и отсутствие флюкул за его границами при всех трех положениях резца в зоне обработки (верхнем, среднем, нижнем). Величина магнитной индукции в зоне режущей кромки резца при величине рабочего зазора от 0,5 до 5 мм составляет от 0,34 до 0,13 Тл. Однако известно, что в диапазоне таких значений магнитной индукции производительность MAO низкая.

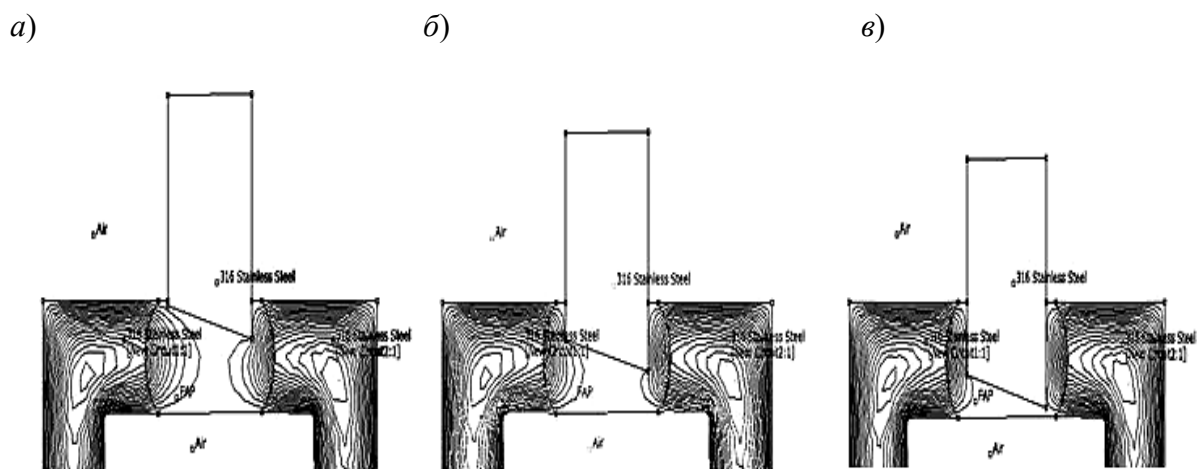


Рис. 2. Топография магнитного поля в рабочем зазоре, образованном полюсными наконечниками электромагнитов со сферической формой торцев, рассчитанная в программе FEMM 4.2 для различных положений резца: а – верхнее; б – среднее; в – нижнее

При конической форме профиля торцев полюсных наконечников электромагнитов наблюдается флокуляция магнитного потока (около 20 %) с максимальной величиной магнитной индукции 0,18 Тл (рис. 3). В рабочем зазоре наибольшая концентрация линий магнитной индукции (0,78 Тл) происходит в зоне средней части передней поверхно-

сти резца. У верхней и нижней границ рабочего зазора величина магнитной индукции составляет 0,31 и 0,41 Тл соответственно, что является недостаточным для осуществления нормального процесса MAO.

В зазоре, образованном полюсными наконечниками электромагнитов с плоской формой торцев (рис. 4), при ве-

личине рабочего зазора  $\delta = 1$  мм наблюдается наиболее равномерное распределение МП в рабочей зоне с максимальным значением магнитной индукции 0,93 Тл. В пространстве вне рабочего зазора отсутствует заметная флокуляция магнитного потока.

Сравнительная оценка результатов расчета топографии магнитного поля в рабочем зазоре, образованном различной формой торцевой поверхности полюсных наконечников электромагнитов, представлена в табл. 1.

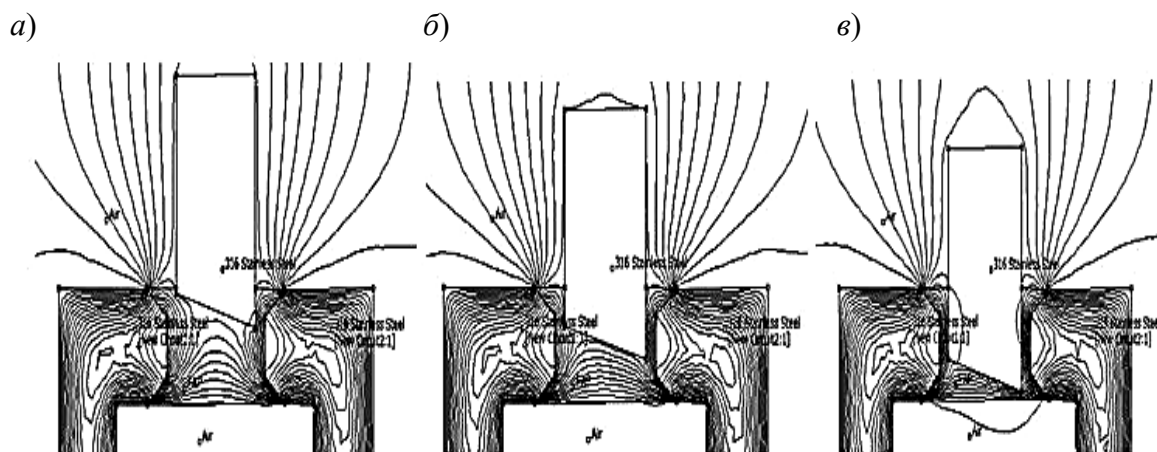


Рис. 3. Топография магнитного поля в рабочем зазоре, образованном полюсными наконечниками электромагнитов с конической формой торцев, рассчитанная в программе FEMM 4.2 для различных положений резца: *a* – верхнее; *б* – среднее; *в* – нижнее

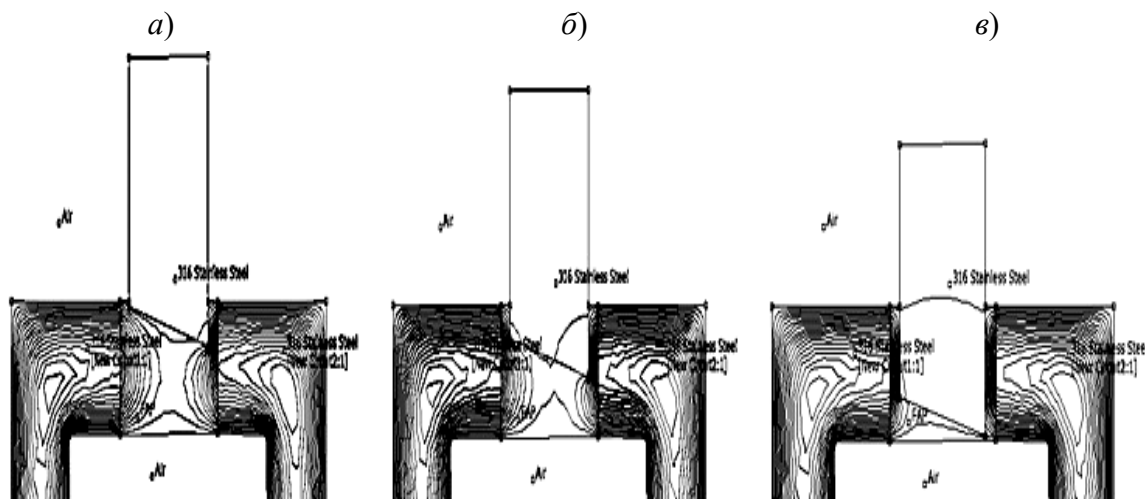


Рис. 4. Топография магнитного поля в рабочем зазоре, образованном полюсными наконечниками электромагнитов со сферической формой торцев, рассчитанная в программе FEMM 4.2 для различных положений резца: *a* – верхнее; *б* – среднее; *в* – нижнее

Табл. 1. Результаты расчета топографии МП

Величина магнитной индукции в зоне рабочего зазора $B$ , Тл/градиент магнитной индукции, Тл/мм			
Форма торцевой поверхности полюсных наконечников	Положение резца		
	верхнее	среднее	нижнее
Сферическая	0,34/0,34	0,13/0,03	0,28/0,28
Коническая	0,31/0,15	0,78/0,78	0,41/0,27
Плоская	0,91/0,91	0,93/0,93	0,81/0,81

Экспериментальные исследования проводили при МАО режущей части резцов автоматных отрезных пластинчатых  $3 \times 12 \times 125$  мм (ТУ 2-035-491–76), предназначенных для отрезки тонкостенных труб в производстве глушителя звука грузовых автомобилей. На основе результатов проведенных исследований топографии МП при МАО резцов применяли полюсные наконечники с плоской формой торцевой поверхности.

Исходная шероховатость поверхностей резца в зоне режущей кромки после заточки абразивным кругом составляла: передней –  $Ra = 0,2$  мкм; задней –  $Ra = 0,16$  мкм. Режущая кромка, образованная пересечением передней и задней поверхностей, не имела явно выраженной геометрической формы, и на ней наблюдались прерывистые односторонние заусенцы.

Параметры и режимы МАО: величина магнитной индукции  $B = 0,5 \dots 1,0$  Тл; скорость движения резца  $V_o = 0,10 \dots 0,25$  дв. ход/мин; величина рабочего зазора  $\delta = 1 \dots 4$  мм; коэффициент заполнения рабочего зазора  $K_z = 0,8 \dots 1,0$ ; размерность частиц ФАП  $\Delta = 63/100$  мкм; ФАП –  $FeV_x - W_4C$  (патент РБ № 6028); СОТС (патент РБ № 23142) – 3-процентный водный раствор; расход СОТС составляет 150 мл/мин; скорость подачи СОТС  $w = 0,55$  м/с; время обработки  $t$  равно 30, 60, 90 и 120 с. Кинематика движения резца – поступательное в соответствии с [12]. Величину шероховато-

сти  $Ra$  определяли профилометром TR210 по ГОСТ 19300–86, измерение радиуса округления режущих кромок резца проводили с помощью двойного микроскопа МИС-11 путем определения профиля режущей кромки методом просвечивания с использованием шаблонов при общем увеличении 157 крат и допускаемой погрешности 10 %.

Эксперименты проводили для двух вариантов расположения резца относительно торцевых плоских поверхностей полюсных наконечников магнитопровода: параллельном расположении передней поверхности резца и перпендикулярном. При первом варианте шероховатость передней и задней поверхностей резца после МАО была одинаковой и находилась в пределах  $Ra = 0,08 \dots 0,04$  мкм в зависимости от времени обработки (рис. 5). При втором варианте шероховатость передней поверхности резца после МАО в зависимости от времени обработки составляла  $Ra = 0,14 \dots 0,12$  мкм и задней –  $Ra = 0,13 \dots 0,08$  мкм (рис. 6).

Экспериментально установлено, что после МАО при параллельном расположении передней поверхности резца относительно плоской торцевой поверхности полюсного наконечника магнитопровода шероховатость передней и задней поверхностей резца в зоне режущей кромки уменьшается в 2–4 раза, а радиус округления режущей кромки резца находится в пределах  $0,02 \dots 0,03$  мм.

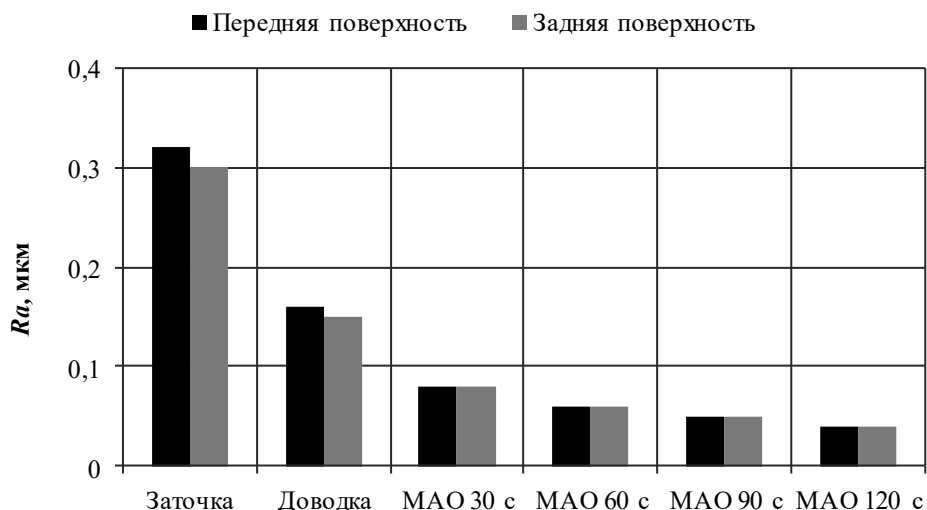


Рис. 5. Шероховатость передней и задней поверхностей резца после различных методов обработки и MAO при расположении передней поверхности резца параллельно торцу полюсного наконечника

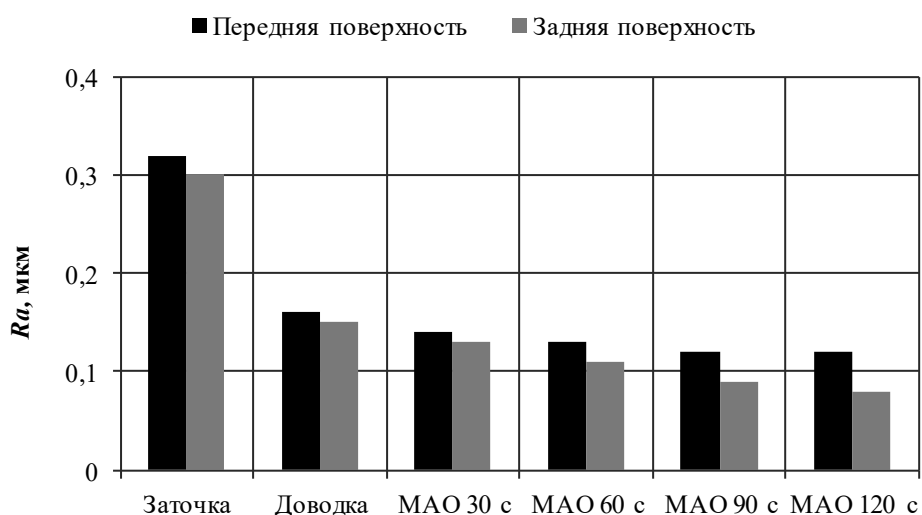


Рис. 6. Шероховатость передней и задней поверхностей резца после различных методов обработки и MAO при расположении передней поверхности резца перпендикулярно торцу полюсного наконечника

### Заклучение

1. Для повышения качества режущей части токарных отрезных пластинчатых резцов теоретически обоснована целесообразность проведения после их заточки дополнительной финишной магнитно-абразивной обработки, обеспечивающей округление режущей кромки и уменьшение шероховатости передней и задней поверхностей резцов.

2. Моделированием топографии магнитного поля установлено, что наибольшая концентрация магнитного потока в рабочей зоне происходит у поверхности полюсных наконечников с плоским профилем торцевой поверхности магнитопроводов и параллельном расположении относительно нее передней поверхности резца при MAO.

3. Экспериментально установлено, что MAO обеспечивает цилиндри-



ческую форму поверхности округления режущей кромки резца радиусом 0,02...0,03 мм, а шероховатость по-

верхностей, образующих режущее лезвие отрезных пластинчатых резцов, по параметру  $Ra$  не превышает 0,8 мкм.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энциклопедия машиностроения. Т. 3: Технология изготовления деталей машин / А. М. Дальский [и др.]. – Москва: Машиностроение, 2000. – 420 с.
2. К вопросу использования лазерного оборудования в цехах гибких автоматизированных производств / М. А. Яшина [и др.] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 12. – С. 1301–1306.
3. Теория и практика абразивной резки труб: монография / Е. А. Левченко [и др.]. – Москва: Вузовский учебник; ИНФРА-М, 2018. – 142 с.
4. **Талантов, Н. В.** Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н. В. Талантов. – Москва: Машиностроение, 1992. – 240 с.
5. Финишная обработка поверхностей / С. А. Клименко [и др.]; под общ. ред. С. А. Чижика, М. Л. Хейфеца. – Минск: Беларуская навука, 2017. – 378 с.
6. **Янюшкин, А. С.** Контактное взаимодействие при комбинированном электроалмазном затачивании твердосплавных инструментов: автореф. дис ... д-ра техн. наук / А. С. Янюшкин; Братский гос. техн. ун-т. – Иркутск, 2004. – 44 с.
7. **Козлов, А. М.** Влияние контактных процессов на износ круга при шлифовании / А. М. Козлов, Д. В. Боглов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 2. – С. 50–53.
8. **Лапшин, В. В.** Разработка технологии и исследование качества заточки прецизионных резцов из сверхтвердых материалов / В. В. Лапшин, С. В. Грубый // Наука и образование. – 2012. – № 9. – С. 8–22.
9. **Попов, М. А.** Влияние радиуса округления режущей кромки на повышение качества поверхностного слоя детали / М. А. Попов, В. В. Максаров, И. А. Бригадов // Изв. ТулГУ. – 2021. – Вып. 9. – С. 30–35.
10. **Носенко, В. А.** Моделирование совмещенной абразивной обработки / В. А. Носенко // Инструмент и технологии. – 2004. – № 17–18. – С. 162–167.
11. **Акулович, Л. М.** Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей деталей сельскохозяйственных машин / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. – Минск: БГАТУ, 2019. – 272 с.
12. **Барон, Ю. М.** Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущего инструмента / Ю. М. Барон. – Ленинград: Машиностроение, 1986. – 172 с.
13. **Dehof, A.** Magnetabrasives Entgraten der Zahnstizhkanten van Zahnraclern / A. Dehof, R. Krull, W. Mattkell // Werkstatt und Betrieb. – 1984. – № 117. – P. 2–4.
14. Численное исследование проблем концентрации магнитного потока для синтеза высокоэффективных магнитных систем / О. П. Муравлев [и др.] // Проблемы информатики. – 2012. – № 5. – С. 30–35.
15. **Приступ, А. Г.** Моделирование магнитных полей в программе Femm / А. Г. Приступ, А. В. Червяков. – Новосибирск: НГТУ, 2012. – 92 с.

*Статья сдана в редакцию 28 декабря 2022 года*

**Леонид Михайлович Акулович**, д-р техн. наук, проф., Белорусский государственный аграрный технический университет. Тел.: +375-296-19-05-04. E-mail: leo-akulovich@yandex.ru.

**Леонид Сергеевич Сергеев**, канд. техн. наук, доц., Белорусский государственный аграрный технический университет. Тел.: +375-293-52-79-63. E-mail: l.sergeev.mail@gmail.com.

**Leonid Mikhailovich Akulovich**, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Belarusian State Agrarian Technical University. Tel.: +375-296-19-05-04. E-mail: leo-akulovich@yandex.ru.

**Leonid Sergeevich Sergeev**, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor, Belarusian State Agrarian Technical University. Tel.: +375-293-52-79-63. E-mail: l.sergeev.mail@gmail.com.