

DOI: 10.34220/2311-8873-2025-9-15



УДК 621.9.047

UDC 621.9.047

2.5.6 – технология машиностроения

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА
МИКРОРЕЗАНИЯ
ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОМ
ШЛИФОВАНИИ**

Лебедев Валерий Александрович,
к.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения», Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону.

Болдырев Александр Иванович,
д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения», Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж.

Болдырев Александр Александрович,
к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения», Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж.

Падурец Анна Александровна,
к.ф.н., доцент кафедры иностранных языков и технологии перевода, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж.

✉¹ **Санамян Георгий Валерьевич,**
к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация и ремонт машин», Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, e-mail: George.VS@inbox.ru

Аннотация. Изложены результаты экспериментальных исследований комбинированного процесса электрохимического шлифования, сочетающего в себе анодное растворение обрабатываемого материала и процессы механического резания. Электрохимическое воздействие на поверхностный слой детали оказывает существенное влияние на условия микрорезания и сам процесс электрохимического шлифования. Экспериментальным исследованиям на спроектированной и изготовленной

**EXPERIMENTAL STUDIES OF
MICROCUTTING PROCESS
IN ELECTROCHEMICAL GRINDING**

Lebedev Valery Aleksandrovich,
candidate of technical sciences, professor of the department of mechanical engineering, Don state technical university, Rostov-on-Don.

Boldyrev Alexandr Ivanovich,
doctor of technical sciences, professor of the department of mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, Voronezh.

Boldyrev Alexandr Alexandrovich,
candidate of technical sciences, associate professor of the department of mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, Voronezh.

Padurets Anna Alexandrovna,
candidate of philological sciences, associate professor of the department of foreign languages and translation technology, Voronezh state technical university, Voronezh.

✉¹ **Sanamyan Georgiy Valerievich,**
candidate of technical sciences, associate professor of the department of exploitation and repair of the machines, Rostov state transport university, Rostov-on-Don, e-mail: George.VS@inbox.ru

Annotation. The results of experimental studies on the combined process of electrochemical grinding, including anodic dissolution of the material being processed and mechanical cutting processes, are presented. The electrochemical effect on the surface layer of the part has a significant impact on the microcutting conditions and the electrochemical grinding process itself. Samples made of corrosion-resistant and heat-resistant steel and titanium deformable alloy were subjected to experimental studies on the designed and

на базе плоскошлифовального станка модели 3Г71 подвергались образцы, изготовленные из коррозионно-стойкой и жаростойкой стали 12Х18Н9Т и титанового деформируемого сплава ВТ-6С. В качестве рабочих сред применялись 15 % водные растворы хлорида натрия (NaCl), нитрата натрия (NaNO_3), сульфата натрия (Na_2SO_4). Методика исследований заключалась в измерении сил, возникающих при микрорезании поверхности, доведенной механическим способом до $R_a = 0,16$ мкм, и поверхности, подвергнутой анодному травлению. Изучение электрохимической составляющей доказало, что наиболее интенсивному анодному растворению подвергаются границы зерен: представлены зависимости глубины растравливания границ зерен от состава электролита и плотности тока. Исследования показали, что в электролите, содержащем NaCl , процесс анодного растворения стали 12Х18Н9Т протекает без образования каких-либо окислов на поверхности образцов, а в электролитах на основе NaNO_3 и Na_2SO_4 он сопровождается образованием окисных пленок. При обработке сплава ВТ-6С в электролите, содержащем NaCl , максимальная глубина растравливания составляла 7 мкм, а в электролите на основе NaNO_3 всего лишь 3,8 мкм. Увеличение плотности тока до 25-40 А/см² при обработке стали 12Х18Н9Т и до 15-20 А/см² при обработке титанового сплава ВТ-6С сопровождается ростом глубины растравливания, дальнейшее увеличение плотности тока в большинстве случаев приводит к уменьшению глубины растравливания. Влияние температуры электролита на глубину растравливания по границам зерен является весьма существенным. Установлено, что за счет анодного растворения уменьшались силы резания, что продлевало сроки эксплуатации абразивных инструментов и повышало качество обработки.

Ключевые слова: КОМБИНИРОВАННЫЙ ПРОЦЕСС, ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ШЛИФОВАНИЕ, ЖАРОСТОЙКАЯ СТАЛЬ, ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ, ГЛУБИНА РАСТРАВЛИВАНИЯ, СИЛЫ РЕЗАНИЯ.

manufactured model of a surface grinding machine. 15% aqueous solutions of sodium chloride (NaCl), sodium nitrate (NaNO_3), and sodium sulfate (Na_2SO_4) were used as working media. The research methodology consisted of measuring the forces arising during micro-cutting a surface drawn mechanically to $R_a = 0,16$ μm and a surface subjected to anodic etching. The study of the electrochemical component has proven that grain boundaries undergo the most intense anodic dissolution; the dependences of grain boundary depth etching on the electrolyte composition and current density are presented. Studies have shown that in an electrolyte containing NaCl , the process of anodic dissolution of steel occurs without the formation of any oxides on the surface of the samples, and in electrolytes based on NaNO_3 and Na_2SO_4 it is accompanied by the formation of oxide films. When processing the titanium alloy in an electrolyte containing NaCl , the maximum etching depth was 7 μm , and in an electrolyte based on NaNO_3 it was only 3.8 μm . An increase in current density to 25-40 А/см² when processing steel and to 15-20 А/см² when processing titanium alloy is accompanied by an increase in the depth of etching; a further increase in the current density in most cases leads to a decrease in the depth of etching. The influence of electrolyte temperature on the depth of etching along grain boundaries is very significant. It was found that due to anodic dissolution, cutting forces were reduced, which extended the service life of abrasive tools and improved the quality of processing.

Keywords: COMBINED PROCESS, ELECTROCHEMICAL GRINDING, HEAT-RESISTANT STEEL, TITANIUM ALLOY, ETCHING DEPTH, CUTTING FORCES.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Общеизвестно, что электрохимическое шлифование, как комбинированный процесс обработки металлов и сплавов, состоит из двух составляющих: анодного растворения и механического резания (микрорезания) материала. Установлено, что эти процессы взаимосвязаны между собой и оказывают влияние друг на друга [1, 2].

При электрохимическом шлифовании заготовка является анодом, а шлифовальный круг – катодом. При протекании постоянного тока между анодом и катодом создается реакция, при которой материал удаляется с анода и смывается потоком рабочей среды (электролитом). Такое анодное растворение, предшествующее процессу микрорезания, изменяет условия пластической деформации срезаемого материала. Это связано с тем, что поверхностные слои обрабатываемого материала «ослаблены» в результате преимущественного растворения одной из фазовых составляющих обрабатываемого материала.

Результаты исследований качества поверхности, полученной в условиях электрохимической размерной обработки различных токопроводящих материалов, достаточно хорошо освещены в технической литературе [3-5]. Однако специфические особенности процесса анодного растворения в условиях электрохимического шлифования (высокие плотности тока, депассивация поверхностного слоя деталей и т.д.) требуют проведения дополнительных исследований.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на выяснение влияния анодного растворения на процесс механического микрорезания.

2 Материалы и методы

Для исследований процесса анодного растворения была спроектирована и изготовлена специальная установка на базе плоскошлифовального станка модели 3Г71, позволяющая проводить эксперименты в широком диапазоне изменения потенциалов, температур, длительности импульсов, а также при различной скорости протекания электролита. Опытные образцы изготавливались из коррозионно-стойкой и жаростойкой стали 12Х18Н9Т (ГОСТ 5632-2014) и титанового деформируемого сплав ВТ-6С (ГОСТ 19807-91). В качестве электролитов применялись 15 % водные растворы хлорида натрия (NaCl), нитрата натрия (NaNO₃), сульфата натрия (Na₂SO₄). В основу методики измерений глубины растравливания было положено свойство отпечатка, полученного с помощью твердомера ТКМ-459, изменять свои размеры при последовательном снятии тонких слоев с исследуемой поверхности.

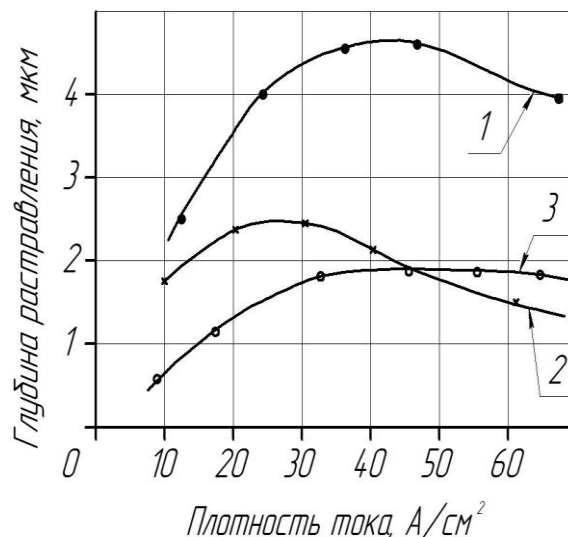
Для изучения процесса микрорезания при наличии анодного растворения поверхности была разработана и изготовлена специальная установка на базе прецизионного токарного станка модели 16К20П. Микрорезание на этой установке осуществлялось по схеме работы резбового резца. В качестве режущего инструмента использовались специальные резцы, оснащенные твердым сплавом Т15К6, Эльбором-Р и кубическим нитридом бора. Методика исследований заключалась в измерении сил, возникающих при микрорезании поверхности, доведенной механическим способом до $R_a = 0,16$ мкм, и поверхности, подвергнутой анодному травлению.

3 Результаты исследований

Влияние режимных параметров на анодное растворение металла при электрохимическом шлифовании

Анализ поверхности образцов показал, что независимо от выбранного материала и состава электролита (из числа вышеперечисленных) наиболее интенсивному анодному растворению подвергаются границы зерен. Это объясняется тем, что электродный потенциал границ зерен обычно менее положителен, чем потенциал самих зерен. Поэтому скорость растворения границ будет выше скорости растворения остальной поверхности.

На рис. 1 представлены зависимости глубины растравливания границ зерен от состава электролита и плотности тока. Из графиков видно, что при использовании в качестве электролита 15 % водного раствора NaCl происходит наиболее интенсивное растравливание границ зерен. Так, при обработке стали 12X18H9T в этом электролите максимальная глубина растравливания составляет около 5 мкм, а при использовании 15 % водного раствора NaNO_3 – только 2,5 мкм. Для электролита, содержащего 15 % Na_2SO_4 , наибольшая глубина растравливания находится в пределах 2 мкм.



1 – 15 % водный раствор NaCl ; 2 – 15 % водный раствор NaNO_3 ; 3 – 15 % водный раствор Na_2SO_4

Рисунок 1 – Зависимость глубины растравливания по границам зерен от плотности тока (сталь 12X18H9T, температура электролита – 40°C , длительность импульса – 1 с)

Как показали исследования, в электролите, содержащем NaCl , процесс анодного растворения стали 12X18H9T протекает без образования каких-либо окислов на поверхности образцов, а в электролитах на основе NaNO_3 и Na_2SO_4 он сопровождается образованием окисных пленок. По-видимому, последнее снижает не только общую интенсивность анодного процесса, но и интенсивность растворения границ зерен.

При обработке сплава ВТ-6С в электролите, содержащем NaCl , максимальная глубина растравливания составляет 7 мкм, а в электролите на основе NaNO_3 – 3,8 мкм. Повышенная интенсивность растворения границ зерен в 15 % растворе NaCl объясняется нарушением окисной пленки, обусловленным активирующим влиянием ионов Cl^- .

Увеличение плотности тока до 25–40 А/см^2 при обработке стали 12X18H9T и до 15–20 А/см^2 при обработке титанового сплава ВТ-6С сопровождается ростом глубины растравливания. При увеличении плотности тока свыше 25–40 А/см^2 (для стали) и свыше 15–20 А/см^2 (для титанового сплава) в большинстве случаев наблюдается уменьшение глубины растравливания. Это объясняется тем, что процесс анодного растворения определяется двумя стадиями: электрохимической и диффузионной [6]. При относительно низких плотностях тока определяющей является электрохимическая стадия. Поэтому увеличение плотности тока до 15–40 А/см^2 приводит к интенсификации анодного растворения по границам зерен. При плотностях тока свыше 15–40 А/см^2 роль диффузионных ограничений становится определяющей. Вязкость электролита при анодном слое увеличивается. Это обстоятельство ведет к затормаживанию диффузионных процессов, связанных с подводом ионов к поверхности анода, и, следовательно, к уменьшению скоростей растворения фазовых составляющих обрабатываемого материала [7].

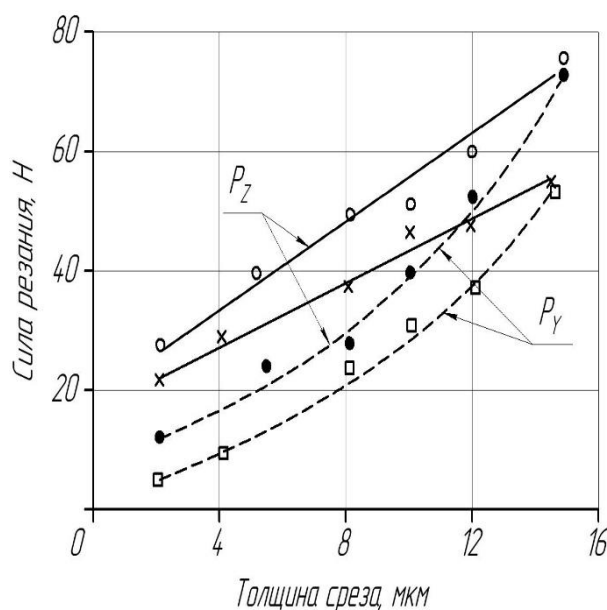
Исследования показали, что влияние температуры электролита на глубину растравливания по границам зерен является весьма существенным. Так, при увеличении температуры от

20 до 60° С глубина растравливания возрастает от 2 до 6-7 мкм. Это также может объясняться уменьшением вязкости электролита в прианодном слое.

Наличие растравливания по границам зерен создает определенный микрорельеф поверхности, предопределяющий снижение его прочностных характеристик, что отражается на протекании процесса микрорезания.

Процесс микрорезания при электрохимическом шлифовании

В результате экспериментальных исследований было определено, что в большинстве случаев силы, возникающие при микрорезании поверхностей указанных образцов, могут существенно отличаться друг от друга. Как правило, значения сил при микрорезании поверхностей, подвергнувшимся анодному растворению, были меньше. Установлено, что разница в силах зависит, в первую очередь, от толщины срезаемого слоя (рис. 2). Увеличение толщины среза сопровождается уменьшением разницы в силах. А при толщине, равной 15 мкм и больше, силы резания в обоих случаях равны между собой. Последнее объясняется тем, что толщина поверхностного слоя, обладающего пониженными прочностными характеристиками, не превышает 4,5-5 мкм (для стали 12X18H9T). Естественно, что разница в силах будет наибольшей при малых толщинах среза, когда режущее лезвие деформирует только этот дефектный слой. А по мере того, как в работу вступают слои металла, не подвергавшиеся каким-либо воздействиям, значения сил должны выравниваться. Подтверждением этого может служить тот факт, что при обработке титанового сплава ВТ-6С, имеющего наибольшую глубину растравливания по границам зерен (7-8 мкм), толщина среза, при которой разница в силах резания нивелируется, больше 15 мкм.



- 1 – поверхность после механической обработки;
2 – поверхность после анодного растворения

Рисунок 2 – Зависимость сил микрорезания от толщины среза (сталь 12X18H9T, плотность тока – 30 А/см², электролит – 15 % водный раствор NaNO₃)

Установлено также, что увеличение скорости микрорезания способствует как уменьшению абсолютного значения сил резания при обработке обоих видов поверхностей образцов, так и разнице между ними. Это объясняется проявлением общего закона процесса резания, согласно которому влияние любого фактора тем сильнее, чем менее благоприятно протекает процесс стружкообразования [8]. В данном случае увеличение скорости резания способствует уменьшению деформации срезаемого металла и, как следствие, уменьшению наблюдаемого эффекта.

Аналогичная картина наблюдается при изучении влияния формы режущего инструмента (различных передних углов γ) на разницу в силах резания. Установлено, что наиболее эффективно использование предварительной электрохимической обработки поверхности для режущих элементов с отрицательными передними углами. При использовании инструментов, имеющих положительные передние углы, силы микрорезания поверхностей образцов, подвергнутых анодному растворению и обработанных механическим путем, отличаются в меньшей степени. В этом случае деформация срезаемого слоя металла при работе инструментами с отрицательными передними углами больше, чем у инструментов, имеющих положительные передние углы. Естественно, что эффект снижения сил микрорезания при обработке поверхностей, подвергнутых анодному растворению, в первом случае будет более существенным.

4 Обсуждение и заключение

Полученные результаты позволяют оценить экспериментальные значения сил резания на единичном зерне в условиях анодного растворения обрабатываемой поверхности.

На основании исследований характеристик рельефа рабочей поверхности, обрабатываемой абразивными инструментами для электрохимического шлифования, зная закон распределения зерен на высоте над уровнем связки, геометрию зерен и их количество на единице поверхности круга для шлифования [5], можно установить число зерен, работающих с различной глубиной резания на площадке контакта круга с обрабатываемой деталью и подойти к расчетному определению сил резания в реальных условиях электрохимического шлифования.

Результаты экспериментальных исследований показали ряд преимуществ электрохимического шлифования перед традиционным механическим шлифованием:

- сьем металла осуществлялся как электрохимическим, так и механическим способом;
- за счет анодного растворения уменьшались силы резания, что продлевало сроки эксплуатации абразивных инструментов;
- повышалось качество обработки вследствие отсутствия заусенцев и постобработки деталей.

Все это позволяет рекомендовать применение электрохимического шлифования в различных отраслях отечественного машиностроения при обработке деталей машин из высокопрочных и труднообрабатываемых материалов при гарантированном обеспечении высоких требований к качеству обработки, в частности, при изготовлении силовых, рабочих лопаток газовых турбин и компрессоров и др.

Список литературы

- 1 Смоленцев В.П., Болдырев А.И., Старов В.Н. Технологические методы обеспечения качества изделий авиационно-космической техники // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. № 2. – С. 144-148.
- 2 Формализация напряженно-деформированного состояния детали с подвижной границей в условиях электрического и комбинированного формообразования / А.И. Болдырев, С.В. Усов, А.А. Болдырев, В.А. Нилов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Т. 10. № 1. – С. 16-19.
- 3 Комбинированные методы обработки / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, А.В. Кузовкин, Г.П. Смоленцев, А.И. Часовских. Воронеж: ВГТУ, 1996. – 168 с.
- 4 Современные технологии формообразования / В.А. Лебедев, А.И. Болдырев, М.А. Тамаркин, Ю.П. Анкудимов. М.: ИНФРА-М, 2019. – 320 с.
- 5 Бердник В.В. Шлифование токопроводящими кругами с наложением электрического тока. Киев: Вища школа, 1984. – 124 с.
- 6 Атанасянц А.Г. Анодное поведение металлов. М.: Металлургия, 1989. – 151 с.
- 7 Механизм анодного растворения коррозионностойких и конструкционных сталей в условиях электроимпульсного полирования / Н.П. Иванов [и др.] // Наука и техника. – 2013. – № 1. – С. 18-23.
- 8 Быкадорова О.Г., Шумячер В.М. О механизме стружкообразования при шлифовании // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2004. – № 1. – С. 53-59.

References

- 1 Smolentsev V.P., Boldyrev A.I., Starov V.N. Technological methods for ensuring the quality of aerospace products // Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2012. T. 8. No. 2. P. 144-148.
- 2 Formalization of the stress-strain state of a part with a moving boundary in conditions of electrical and combined shaping / A.I. Boldyrev, S.V. Usov, A.A. Boldyrev, V.A. Nilov // Bulletin of Voronezh State Technical University. 2014. T. 10. No. 1. P. 16-19.
- 3 Combined processing methods / V.P. Smolentsev, A.I. Boldyrev, A.V. Kuzovkin, G.P. Smolentsev, A.I. Chasovskikh. Voronezh: VSTU, 1996. 168 p.
- 4 Modern technologies of shaping / V.A. Lebedev, A.I. Boldyrev, M.A. Tamarkin, Yu.P. Ankudimov. M.: INFRA-M, 2019. 320 p.
- 5 Berdnik V.V. Grinding with conductive wheels with the application of electric current. Kyiv: High School, 1984. 124 p.
- 6 Atanasyants A.G. Anodic behavior of metals. M.: Metallurgy, 1989. 151 p.
- 7 Mechanism of anodic dissolution of corrosion-resistant and structural steels under conditions of electric pulse polishing / N.P. Ivanov [and others] // Science and technology. 2013. № 1. P. 18-23.
- 8 Bykadorova O.G., Shumyacher V.M. On the mechanism of chip formation during grinding // Bulletin of the Saratov State Technical University. 2004. No. 1. P. 53-59.

© Лебедев В. А., Болдырев А. И., Болдырев А. А., Падурец А. А., Санамян Г. Г., 2025