

DOI: [10.34220/2311-8873-2023-40-47](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-40-47)



УДК 621.9.047; 621.92

UDC 621.9.047; 621.92

2.5.6 – технология машиностроения

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЧИСТКИ СВАРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

**EXPERIMENTAL STUDIES OF CLEANING WELDING WIRE BY HIGH-VOLTAGE ELECTROCHEMICAL METHOD**

**Болдырев Александр Иванович,**

д-р техн. наук, профессор кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж.

**Boldyrev Alexander Ivanovich,**

Dr. of Tech. Sc., Professor of Mechanical Engineering Technology Chair of the Voronezh State Technical University, Voronezh.

**Болдырев Александр Александрович,**

канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж.

**Boldyrev Alexander Aleksandrovich,**

Cand. of Tech. Sc., Associate Professor of Mechanical Engineering Technology Chair of the Voronezh State Technical University, Voronezh.

**Григораш Владимир Васильевич,**

канд. техн. наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж.

**Grigorash Vladimir Vasilyevich,**

Cand. of Tech. Sc., Associate Professor of Chair of Metal and Wooden Structures of the Voronezh State Technical University, Voronezh.

✉<sup>1</sup> **Перова Алла Владимировна,**

канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: [pva7@mail.ru](mailto:pva7@mail.ru)

✉<sup>1</sup> **Perova Alla Vladimirovna,**

Cand. of Tech. Sc., Associate Professor of Mechanical Engineering Technology Chair of the Voronezh State Technical University, Voronezh, e-mail: [pva7@mail.ru](mailto:pva7@mail.ru)

**Падурец Анна Александровна,**

магистрант кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж.

**Padurets Anna Alexandrovna,**

Master's student of the Mechanical Engineering Technology Chair of the Voronezh State Technical University, Voronezh.

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследований высоковольтного электрохимического катодного процесса очистки сварочной проволоки от окалины, ржавчины и других загрязнений, так как от ее состояния существенно образом зависит качество шва. Описана сущность высоковольтной электрохимической очистки, по которой на обрабатываемую поверхность заготовки электролит подается узким потоком из отверстий насадки

**Annotation.** This article presents the results of studies of the high-voltage electrochemical cathodic process of cleaning the welding wire from scale, rust and other contaminants, since the quality of the weld significantly depends on its condition. The essence of high-voltage electrochemical cleaning is described, according to which electrolyte is supplied to the treated surface of the workpiece by a narrow stream from the holes of the sprayer nozzle. The description of the experiments

спрейера. Приведено описание экспериментов. Отмечается влияние на стабильный ход катодного процесса и качество очистки электрогидравлических и технологических параметров процесса. Установлено отсутствие наводораживания сварочной проволоки, объясняющееся спецификой фазовых превращений в прикатодной зоне. Приводятся рациональные режимы очистки сварочной проволоки.

**Ключевые слова:** СВАРОЧНАЯ ПРОВОЛОКА, ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ, СПРЕЙЕР, ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД.

is given. The authors note the influence on the stable course of the cathodic process and the quality of cleaning of the electro-hydraulic and technological parameters of the process. They determined the absence of the welding wire hydrogenation, which is explained by the specificity of phase transformations in the near-cathode zone. Rational regimes for cleaning the welding wire are given.

**Keywords:** WELDING WIRE, SURFACE CLEANING, SPRAYER, HIGH-VOLTAGE ELECTROCHEMICAL METHOD.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

## 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Для обеспечения процессов сварки высокого качества при изготовлении ответственных изделий ракетно-космической техники необходимо, чтобы параметры сварочной проволоки соответствовали [1]. Поверхность проволоки должна быть чистой и гладкой, без трещин, окалины, ржавчины, масла и других загрязнений, но допускаются риски (в том числе затянутые) и отдельные вмятины, глубина которых не должна превышать допуска по диаметру проволоки. Несмотря на то, что проволока в сварочном процессе является расходным материалом, от ее состояния существенным образом зависит качество шва.

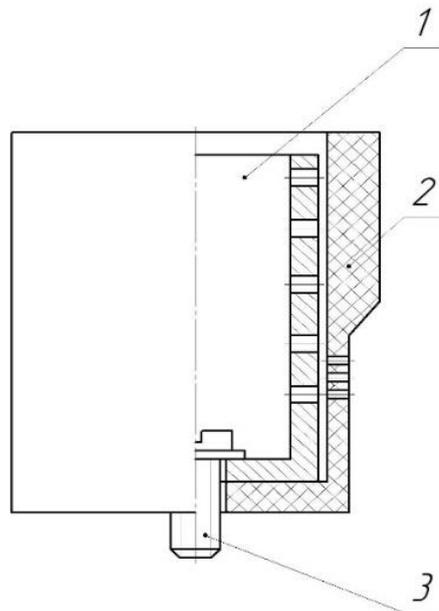
В работах [2-6] рассмотрен ряд традиционных способов очистки (электрогидравлический, пароводоструйный, гидромеханический, в парах растворителей, щелочных расплавах, псевдооживленной среде и др.) наряду с относительно новыми способами (иглофрезерование, самоизмельчение, различные виды виброабразивной обработки, ультразвуковая активация и др.) и приведены сведения об их технологических возможностях. Однако большинство этих способов при очистке сварочной проволоки являются непроизводительными, требуют применения весьма дорогостоящих средств технологического оснащения и трудовых затрат, соблюдения особых мер техники безопасности обслуживающим персоналом. Поэтому поиск новых методов и способов очистки поверхностей сварочной проволоки является весьма актуальной задачей.

## 2 Материалы и методы

Для очистки поверхности сварочной проволоки предложен высоковольтный электрохимический метод в протоке электролита. При использовании данного метода на обрабатываемую поверхность одновременно воздействуют электрохимические, химические и тепловые факторы [7]. Сущность высоковольтной электрохимической очистки состоит в том, на обрабатываемую поверхность заготовки электролит подается узким потоком из отверстий насадки спрейера (разбрызгивающего устройства) (рис. 1) [8]. К металлической части спрейера подводится положительное напряжение, а обрабатываемая заготовка подсоединяется к отрицательному полюсу источника постоянного тока (рис. 2).

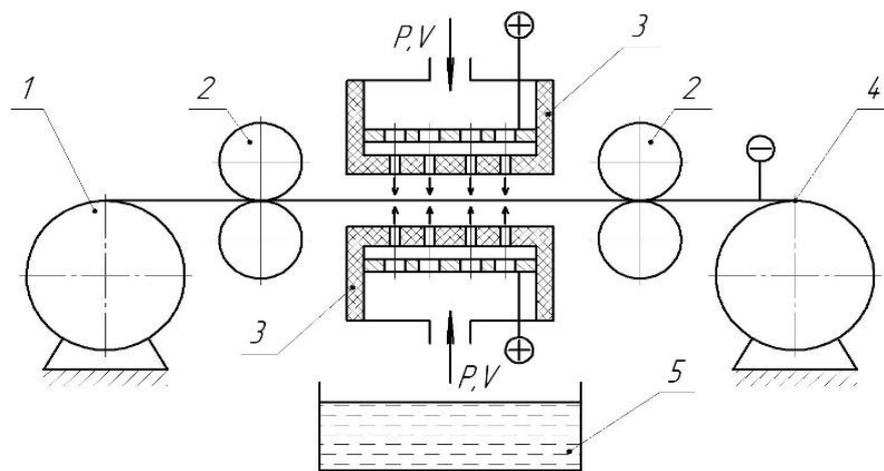
. Предлагаемый метод позволяет обеспечить при напряжении на электродах ванны 200 В и токе 2,6 А плотность тока на катоде 26 А/см<sup>2</sup> и удельную поверхностную мощность тока на катоде 5,4 кВт/см<sup>2</sup> [9, 10]. Исследования процесса электрохимической очистки проволоки

проводились на экспериментальной установке, спроектированной и изготовленной на АО «Конструкторское бюро химавтоматики» (г. Воронеж).



1 – металлический анод; 2 – насадка;  
3 – болт, соединяющий металлический анод с насадкой

Рисунок 1 – Общий вид спрейера



1 – сматывающий барабан; 2 – тянущие и направляющие ролики; 3 – спрейер;  
4 – наматывающий барабан; 5 – ванна для сбора и хранения электролита

Рисунок 2 – Принципиальная схема очистки проволоки

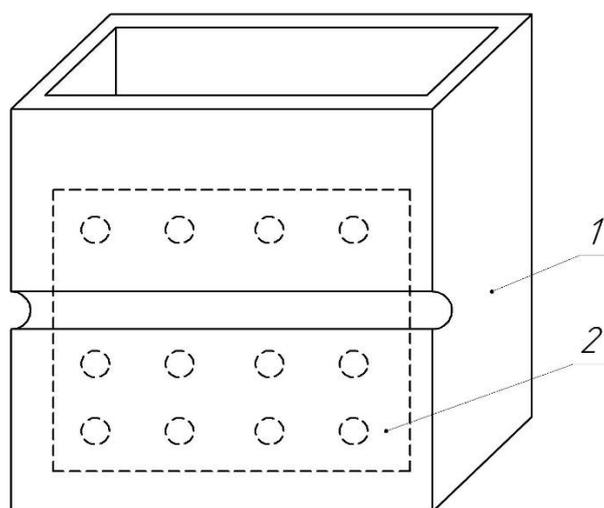
В качестве электролита использовался 5-15 % водный раствор кальцинированной соды [11-14]. Температура электролита составляла 18-24 °С. Образцами являлись: проволоки диаметром 1,2-1,6 мм и прутки диаметром 1,2-2 мм. Напряжение и ток фиксировались с точностью до 1,5 В и 1,5 А, соответственно. Диаметр отверстий насадки спрейера составлял 1-2 мм, а расстояние между отверстиями – 1,2 мм. Качество очистки определялось путем сравнения

(визуально и под микроскопом) обработанной поверхности с поверхностью эталонного образца, который очищался механически и затем протравливался.

### 3 Результаты исследований

Проведенные исследования показали, что стабильность процесса и качество очистки зависят от конструктивных особенностей спрейера. Основным условием нормальной работы спрейера является постоянство размеров насадки. При увеличении размеров отверстий насадки плотность тока падает, время очистки увеличивается. Материал насадок должен обладать высоким электросопротивлением. Достаточной прочностью и термостойкостью. Таким требованиям отвечают керамика, фторопласт, поливинилхлорид и другие материалы. Однако спрейера, имеющие фторопластовые насадки, не обеспечивают стабильности катодного процесса из-за уменьшения диаметра отверстий в результате нагрева фторопласта [15]. Керамические и поливинилхлоридные насадки обеспечивают стабильный ход катодного процесса и качественную очистку.

В результате исследований была разработана оптимальная конструкция спрейера: с насадкой прямоугольной формы (рис. 3).



1 – насадка; 2 – металлический анод

Рисунок 3 – Оптимальная схема конструкции спрейера

При напряжении 190 В, токе 5-6 А, температуре электролита 22 °С расходе электролита 133,3 см<sup>3</sup>/мин поверхность проволоки полностью освобождалась от окислов и становилась блестящей. Скорость перемещения проволоки составляла 3 м/мин. Было отмечено, что окислы удаляются быстрее с той поверхности проволоки, которая обращена к отверстиям насадки. В связи с этим была предложена спрейерная двусторонняя очистка проволоки (рис. 2), что позволило равномерно очищать проволоку по всей поверхности и увеличивать допустимую скорость перемещения до 25-30 м/мин.

При малой скорости перемещения проволоки на отдельных ее участках остаются черные окисные пленки. Такое явление объясняется осаждением катионов металла и окислов на катоде в результате конвекции [16, 17]. На больших скоростях перемещения до 50 м/мин необходимо увеличивать число циклов, что приводит к увеличению скорости обработки.

Существенное влияние на интенсификацию процесса очистки оказывают электрические режимы [18, 19]. Это связано с условиями формирования газопаровой фазы в прикатодной зоне, при которой происходит качественная очистка. При низких напряжениях

на электродах не образуется газопаровая фаза и нет условий для возникновения разрядов, интенсифицирующих процесс удаления окислов. При напряжениях выше 210 В проволока сильно нагревается и перегорает. При напряжениях 180-200 В процесс стабилен, окислы удаляются интенсивно (рис. 4). При таких напряжениях у катода создаются оптимальные условия для образования газопаровой фазы и выделяется максимум энергии [20].

Исследования процесса очистки с использованием переменного тока показали, что при напряжении 100-200 В у катода возникали вспышки, сопровождаемые звуковым эффектом. Это явление, по-видимому, объясняется образованием гремучей смеси. Стабильность процесса нарушалась и удалялся только рыхлый слой ржавчины. Поэтому использование переменного тока для очистки при повышенных напряжениях нецелесообразно.

На стабильный ход катодного процесса и качество очистки оказывают влияние скорость течения, расход, состав, концентрация и температура электролита. Стабильной работа спрейера будет тогда, когда электролит вытекает из отверстий насадки ламинарным потоком, т.е. непрерывными струями. Расход электролита должен соответствовать напряжению на электродах. С увеличением напряжения необходимо увеличивать расход электролита и наоборот. Это позволяет обеспечивать условия образования периодического контакта жидкой и газопаровой фаз с катодом, т.е. условия стабильного хода процесса.

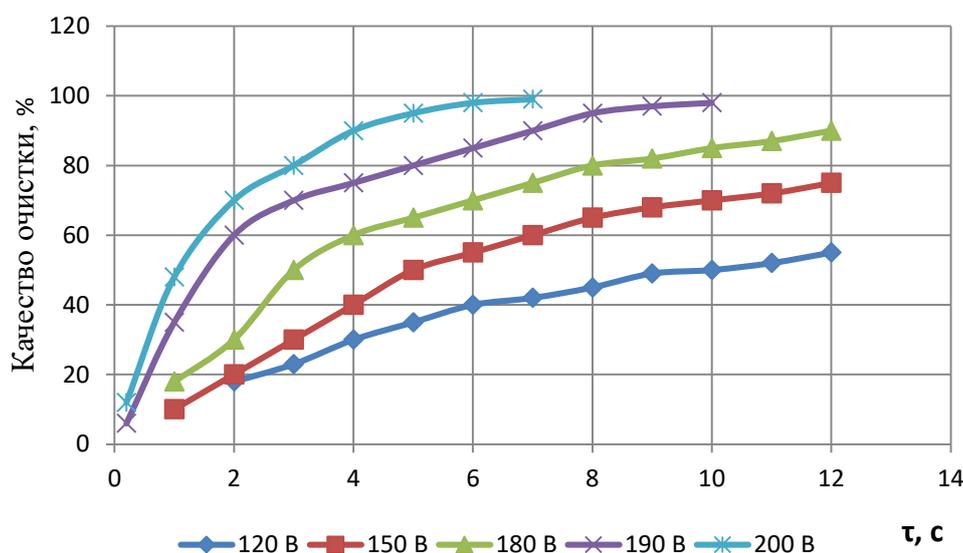


Рисунок 4 – Зависимость качества очистки проволоки от напряжения и времени обработки (электролита – 12 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3 + 88\% \text{H}_2\text{O}$ , температура – 22°C)

Увеличение расхода электролита приводит к увеличению силы тока, и процесс протекает не стабильно (на рис. 5 зоны нестабильного протекания процесса выделены штриховкой), т.к. мощности тока недостаточно для формирования сплошной газопаровой фазы в прикатодной зоне. При недостаточном расходе электролит полностью испаряется в зазоре. В этих случаях нет условий для обеспечения стабильности процесса и возникновения разрядов. Удаление окислов осуществляется медленно.

На качество очистки влияют зазоры между насадкой и обрабатываемой поверхностью, внутренней стенкой насадки и металлическим анодом. Увеличение зазоров приводит к увеличению сопротивления электролита, уменьшению плотности и мощности тока, вследствие чего катодный процесс протекает нестабильно и окислы не удаляются. При отсутствии зазора между проволокой и насадкой процесс протекает стабильно и наблюдается полное удаление окислов. При зазорах размером от 2 мм и больше процесс протекает не стабильно,

а при зазорах размером 0,5-1 мм – стабильно. Экспериментально установлено, что зазор между внутренней стенкой насадки и анодом должен составлять 3,5-3 мм.

Электрохимический катодный процесс сопровождается выделением водорода на катоде. Поэтому очищенную сварочную проволоку исследовали на предмет наводороживания. Химическими, механическими и спектроскопическими исследованиями установлено отсутствие наводороживания сварочной проволоки, что можно объяснить специфической фазовых превращений в прикатодной зоне.

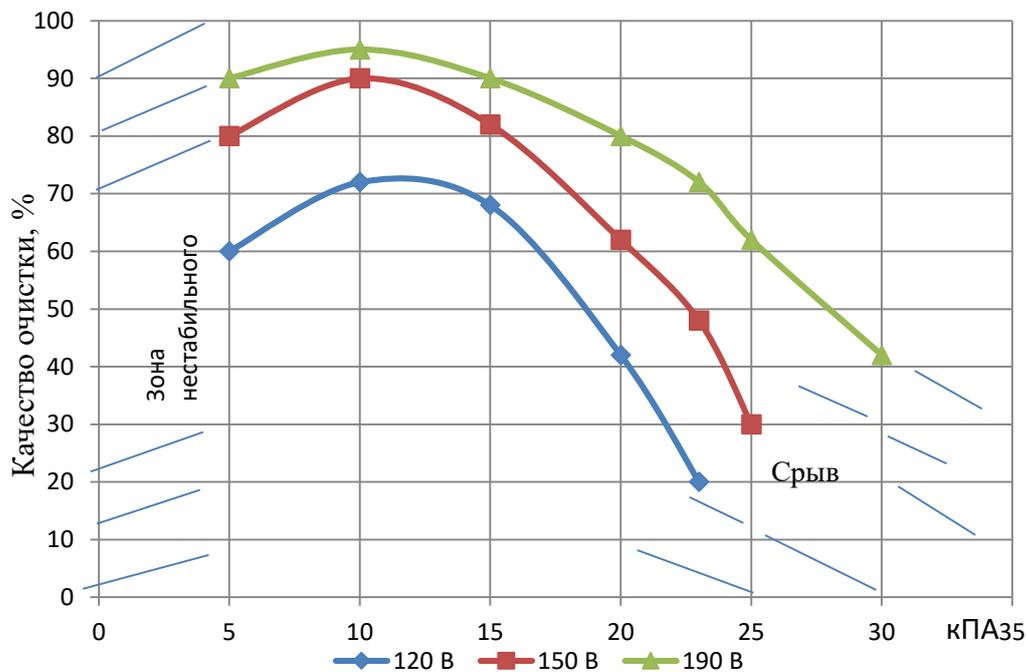


Рисунок 5 – Зависимость качества очистки от давления электролита (электролита – 12 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3 + 88\% \text{H}_2\text{O}$ , температура – 22°C)

Проведенные исследования показали эффективность применения высоковольтного электрохимического катодного метода очистки сварочной проволоки и позволили установить рациональные режимы очистки, приведенные в табл.

Таблица – Технологические режимы электрохимической очистки проволоки

Технологический параметр	Значение режимного параметра
Технологический ток, А	4, 5-6
Рабочее напряжение, В	180-200
Зазор между насадкой и обрабатываемой поверхностью, мм	0,5-1
Зазор между внутренней стенкой насадки и металлическим анодом, мм	2,5-3
Электролит (водный раствор кальцинированной соды), %	6
Температура электролита, °С	18-24
Скорость перемещения проволоки, м/с	0,4

#### 4 Обсуждение и заключение

В работе были проанализированы основные способы очистки сварочной проволоки, используемые при сварке особо ответственных конструкций в аэрокосмической отрасли и установлено,

что наиболее перспективным может стать высоковольтный электрохимический способ, отличающийся от традиционного качеством очистки при высокой производительности процесса.

В результате исследований было разработано приспособление для очистки проволоки и определены граничные условия режимам обработки (табл.). Опыты показали, что применение переменного тока свыше 100 В приводило к возникновению всплесков и ухудшению качества очистки. Анализ различными способами возможного наводороживания поверхности проволоки не подтвердился. Это можно объяснить фазовыми превращениями, протекающими в прикатодной области. Для обеспечения стабильности процесса электролит должен истекать из спрейера непрерывным ламинарным потоком.

Научной новизной данной работы является установление рациональных режимом обработки (электрохимических факторов) на интенсивность и качество процесса очистки поверхности проволоки.

Проведенные исследования показали эффективность применения высоковольтного электрохимического катодного метода очистки сварочной проволоки. Процесс является достаточно производительным, не требует применения весьма дорогостоящих средств технологического оснащения и трудовых затрат, позволяет производить механизацию и автоматизацию очистки.

### Список литературы

- 1 ГОСТ 2246-70. Проволока стальная сварочная. Технические условия. М.: Стандартинформ, – 2008. – 17 с.
- 2 Горшков Б.Т., Конилов Г.К., Татин И.А. Эффективность способов зачистки стали. – М. : Металлургия, – 1979. – 224 с.
- 3 Гарбер М.И. Прогрессивные методы подготовки поверхности // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. – 1980. – №2. – С. 129-137.
- 4 Остановский А.А. Разработка прогрессивного способа очистки сварочной проволоки на основе принципа самоизмельчения // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2021. – №2. – С. 46-53.
- 5 Karasew B., Altynbaiyev A. Pulse Current ECM Facilities // Proc. Intern. Symp. Electromach. (ISEM-X). Magdeburg. – 2002. – P. 430-437.
- 6 Wollenberg G., Schulze H., Lauter M. Process Energy Supply for Unconventional Machining // Proc. Intern. Symp. Electromachining (ISEM-XIII). – Spain, – 2011. – P. 220-232.
- 7 Седыкин Ф.В., Кондратьев В.А., Анненков А.В. Динамика электрохимического катодного процесса удаления окалина с термически обработанных поверхностей в потоке электролита // Финишная электрохимическая обработка поверхностей деталей. – Тула. – 1972. – С. 91-96.
- 8 Пажи Д.Г., Галустов В.Г. Основы техники распыления жидкости. М.: Химия, 1984. 256 с.
- 9 Практикум по физической химии / Ю.Н. Ушакова [и др.]. – Киров: ВятГУ, – 2011. – 87 с.
- 10 Ruszaj A., Czekaj I., Chuchro M. ECM with short interelectrode voltage pulses // Proc. Intern. Symp. Electromach. (ISEM-XII). – Spain. – 2008. – P. 334-342.
- 11 Дамаскин Б.Б., Пертий О.А., Цирлина Г.А. Электрохимия. – М. : Химия, – 2001. – 624 с.
- 12 Винокурова И.М. Ермилов А.В., Дейнега А.А. Особенности выбора электролита для размерной электрохимической обработки металлов // Современные исследования в области технических и естественных наук: сб. тр. конф.. – Белгород. – 2017. – С. 178-184.
- 13 Саушкин Б.П. Выбор и применение электролитов для электрохимической обработки металлов. – М. : ВНИИТЭМП, – 1992. – 68 с.
- 14 Atanasyants A., Saushkin B. Problems of ECM of metals in non traditional electrolytes // Proc. Intern. Symp. Electromach. (ISEM-X). – Magdeburg. – 2002. – P. 438-450.
- 15 Паншин Ю.А., Малкевич С.Г., Дунаевская Ц.С. Фторопласты. Л.: Химия, 1978. 236 с.
- 16 Справочник химика. Т. 3. / под ред. Б.П. Никольского. – М. : Химия, 2009. – 1008 с.
- 17 Сопряженная конвекция раствора у поверхности ионообменных мембран при интенсивных токовых режимах / Н.Д. Письменская [и др.] // Электрохимия. – 2007. – № 3. – С. 325-345.

18 Сундуков В.К. Технологические основы высокоэффективного электролитического формования: автореф. на соиск. ученой степ. докт. техн. наук: 05.03.01 – процессы механической и физико-технической обработки, станки и инструмент. – Тула, – 1998. – 38 с.

19 Rajurkar K., Zhu D., McGeough J. New Developments in ECM // Annals of the CIRP. – 2019. – V. 48/2. – P. 1-13.

20 Шингереева Б.А. Метод удаления и выявления окислительных дефектов // Вестник ДГТУ. Технические науки. – 2016. – № 2. – С. 62-64.

### References

1 GOST 2246-70. Welding steel wire. Technical specifications. M.: Standartinform, - 2008. – 17 p.

2 Gorshkov B.T., Konikov G.K., Tatin I.A. Efficiency of steel stripping methods. – M. : Metallurgy, - 1979. – 224 p.

3 Garber M.I. Progressive methods of surface preparation // Journal of the D.I. Mendeleev All-Union Chemical Society. – 1980. – No.2. – pp. 129-137.

4 Stopsky A.A. Development of a progressive method for cleaning welding wire based on the principle of self-grinding // News of universities. The North Caucasus region. Technical sciences. – 2021. – No. 2. – pp. 46-53.

5 Karasew B., Altynbaiyv A. Pulse Current ECM Facilities // Proc. Intern. Symp. Electromach. (ISEM-X). – Magdeburg. – 2002. – P. 430-437.

6 Wollenberg G., Schulze H., Lauter M. Process Energy Supply for Unconventional Machining // Proc. Intern. Symp. Electromachining (ISEM-XIII). – Spain, – 2011. – P. 220-232.

7 Sedykin F.V., Kondratiev V.A., Annenkov A.V. Dynamics of the electrochemical cathode process of scale removal from thermally treated surfaces in the electrolyte flow // Finishing electrochemical surface treatment of parts. – Tula. – 1972. – pp. 91-96.

8 Pages D.G., Galustov V.G. Fundamentals of liquid spraying technique. M.: Chemistry, 1984. 256 p.

9 Workshop on physical chemistry / Yu.N. Ushakova [et al.]. – Kirov: VyatGU, – 2011. – 87 p.

10 Ruszaj A., Czekaj I., Chuchro M. ECM with short interelectrode voltage pulses // Proc. Intern. Symp. Electromach. (ISEM-XII). – Spain. – 2008. – P. 334-342.

11 Damaskin B.B., Pertiy O.A., Cirlina G.A. Electrochemistry. – M. : Chemistry, – 2001. – 624 p.

12 Vinokurova I.M. Ermilov A.V., Deynega A.A. Features of the choice of electrolyte for dimensional electrochemical processing of metals // Modern research in the field of technical and natural sciences: sat. tr. conf.. – Belgorod. – 2017. – pp. 178-184.

13 Saushkin B.P. Selection and application of electrolytes for electrochemical processing of metals. – M. : VNIITEMR, - 1992. – 68 p.

14 Atanasyants A., Saushkin B. Problems of ECM of metals in non traditional electrolytes // Proc. Intern. Symp. Electromach. (ISEM-X). – Magdeburg. - 2002. – P. 438-450.

15 Panshin Yu.A., Malkevich S.G., Dunaevskaya Ts.S. Fluoroplasts. L.: Chemistry, 1978. 236 p.

16 Handbook of chemist. Vol. 3. / edited by B.P. Nikolsky. – M. : Chemistry, 2009. – 1008 p.

17 Conjugate convection of a solution at the surface of ion-exchange membranes under intense current conditions / N.D. Pisevskaya [et al.] // Electrochemistry. - 2007. – No. 3. – pp. 325-345.

18 Sundukov V.K. Technological foundations of high-efficiency electrolytic molding: abstract. on the job. scientific step. doct. technical sciences: 05.03.01 – processes of mechanical and physical-technical processing, machines and tools. – Tula, - 1998. – 38 p.

19 Rajurkar K., Zhu D., McGeough J. New Developments in ECM // Annals of the CIRP. – 2019. – V. 48/2. – P. 1-13.

20 Shingereeva B.A. Method of removal and detection of oxidative defects // Bulletin of DSTU. Technical sciences. – 2016. – № 2. S. 62-64.