

DOI: 10.34220/2311-8873-2022-4-21

УДК 621.9.047

2.5.5 – технология и оборудование  
механической и физико-технической обработки

### **КОМБИНИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА ЭЛЕКТРОДОМ-ЩЕТКОЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ С ПЕРЕМЕННЫМ ПРИПУСКОМ**

✉<sup>1</sup>**Кириллов Олег Николаевич**  
доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры технологии машиностроения ФГБОУ  
ВО «Воронежский государственный  
технический университет» г. Воронеж, РФ  
e-mail: [kirillov.oli@yandex.ru](mailto:kirillov.oli@yandex.ru)

**Куц Вадим Васильевич**  
доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры машиностроительных технологий и  
оборудования ФГБОУ ВО «Юго-Западный  
государственный университет» г. Воронеж, РФ

**Шендрикова Олеся Олеговна**  
магистрант кафедры технологии  
машиностроения ФГБОУ ВО ФГБОУ ВО  
«Воронежский государственный технический  
университет» г. Воронеж, РФ

#### **Аннотация.**

В статье рассмотрены возможности комбинированной обработки непрофилированным электродом-щеткой изделий с большой неравномерностью исходного профиля. Для оценки величины припуска использован коэффициент неравномерности. Рассмотрены методы получения деталей с переменным припуском, особенности их обработки. Это детали, полученные литьем, сваркой, штамповкой, черновой лезвийной и электроэрозионной обработкой. Поверхности таких деталей зачастую характеризуются высокой твердостью и износостойкостью. На сегодняшний день нет универсального способа обработки таких деталей. Зачастую, такие детали после обработки приходится дорабатывать с помощью зачистных устройств или слесарным методом, что увеличивает время обработки и удорожает процесс. Представляет интерес использование для обработки таких деталей непрофилированного электрода-щеткой, но для этого потребовалось создать эффективную



### **COMBINED ELECTRODE-BRUSH TREATMENT OF SURFACES OF PRODUCTS WITH VARIABLE ALLOWANCE**

✉<sup>1</sup>**Kirillov Oleg Nikolaevich**  
doctor of technical sciences, professor,  
professor of the Department of Mechanical  
Engineering Technology, Voronezh State  
Technical University, Voronezh, RF  
e-mail: [kirillov.oli@yandex.ru](mailto:kirillov.oli@yandex.ru)

**Kuts Vadim Vasilievich**  
doctor of technical sciences, professor, professor  
of the Department of Mechanical Engineering  
Technologies and Equipment of the Southwest  
State University, Voronezh, RF

**Shendrikova Olesya Olegovna**  
undergraduate of the Department of  
Mechanical Engineering Technology,  
Voronezh State Technical University,  
Voronezh, RF

#### **Annotation.**

The article considers the possibilities of combined processing with an unprofiled electrode-brush of products with a large unevenness of the initial profile. The coefficient of unevenness was used to estimate the size of the allowance. Methods of obtaining parts with variable allowance, features of their processing are considered. These are parts obtained by casting, welding, stamping, roughing blade and electroerosion treatment. The surfaces of such parts are often characterized by high hardness and wear resistance. To date, there is no universal way to process such parts. Often, such details, after processing, have to be refined with the help of stripping devices or a locksmith method, which increases the processing time and enhances the process. It is of interest to use an unprofiled brush electrode for processing such parts, but for this it was necessary to create an effective processing technology that ensures a stable flow of the process. As a result of theoretical studies and oscillography of the process, the

технологии обработки, обеспечивающую устойчивое протекание процесса. В результате теоретических исследований и осциллографирования процесса был уточнен механизм процесса обработки, что позволило уточнить истинную величину съема электродом-щеткой и более точно установить ее износ. Был разработан типовой технологический процесс обработки поверхностей с неравномерным припуском. Предложены схемы обработки поверхностей с неравномерным припуском, с регулированием величины прижима электрода-щеткой по минимальному и по максимальному значению припуска. Экспериментально установлены режимы обработки. В статье приведены практические результаты проведенных экспериментов по обработке чугунных решеток с разными режимами.

**Ключевые слова:** ЭЛЕКТРОД-ЩЕТКА, КОЭФФИЦИЕНТ НЕРАВНОМЕРНОСТИ, ПОВЕРХНОСТИ С ПЕРЕМЕННЫМ ПРИПУСКОМ, РАБОЧАЯ СРЕДА, ЛАТУНЬ, НЕРЖАВЕЮЩАЯ СТАЛЬ, ПРИПУСК, РЕЖИМЫ ОБРАБОТКИ, ЧУГУННЫЕ РЕШЕТКИ.

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

mechanism of the processing process was clarified, which made it possible to clarify the true value of the electrode-brush and more accurately determine its wear. A typical technological process of surface treatment with an uneven allowance was developed. Schemes of surface treatment with variable allowance with adjustment of the amount of the brush electrode clamping by the minimum and maximum allowance values are proposed. Processing modes have been experimentally established. The article presents the practical results of experiments on processed cast iron gratings with different modes.

**Keywords:** ELECTRODE BRUSH, COEFFICIENT OF UNEVENNESS, SURFACES WITH VARIABLE ALLOWANCE, WORKING MEDIUM, BRASS, STAINLESS STEEL, ALLOWANCE, PROCESSING MODES, CAST IRON GRATINGS.

### 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В настоящее время в связи с возрастающей сложностью изделий всё большее значение приобретает проблема обработки поверхностей с переменным припуском. Большой интерес представляет применение в качестве инструмента для обработки таких заготовок электрода-щеткой.

Щётка недорога, легко изготавливается, универсальна. Ранее этот способ исследовался в Казани, Воронеже, Москве, Липецке и других научных центрах [1, 2]. В результате длительных исследований была создана установка для зачистки (рис. 1).

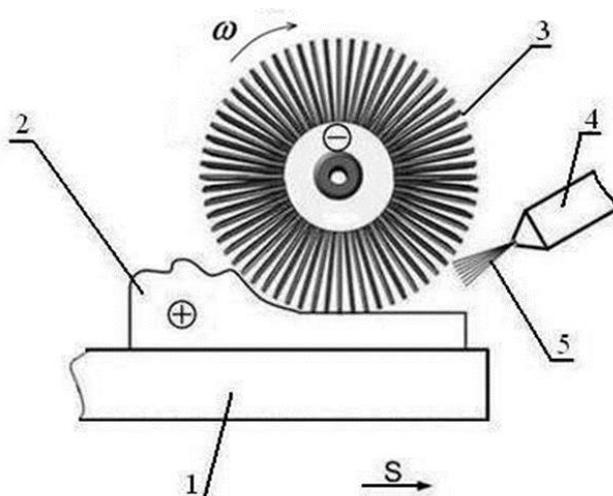


Рисунок 1 – Схема обработки электродом-щеткой

На рабочий стол установки 1, модернизированной для обработки с наложением электрического поля, крепится обрабатываемая заготовка 2. Инструмент электрод-щетка 3 вращается с окружной скоростью  $\omega$ . Заготовка с заданной подачей  $S$  совершает перемещение в направлении электрода-щеточки. Обработка происходит в жидкой рабочей среде 5, которую через сопло 4 подают в зону обработки.

Недостатком процесса изготовления было то, что режим обработки был расчётным для постоянного припуска. В Воронежском государственном техническом университете (ВГТУ) были проведены исследования комбинированной обработки непрофилированным электродом-щеткой. Были получены зависимости для съёма материала, исследовано влияние технологических параметров процесса на производительность, качество, износ электрода-щётки, изучено влияние прижима электрода-щеточки к детали [1, 2]. Однако большинство исследований было выполнено для деталей из мягких сплавов, имеющих равномерный припуск, что является частным случаем использования метода в машиностроении.

Одной из важнейших характеристик обработки электродом-щёткой является ее прижим к заготовке. Известно, что при изменении прижима смещением щетки к заготовке на величину более 0,2 мм показатели обработки существенно меняются.

Для оценки величины припуска был использован коэффициент равномерности

$$k_H = \frac{z_n}{z_n^0}, \quad (1)$$

где  $z_n$  – наибольшая величина припуска обрабатываемой заготовки;  $z_n^0$  – контрольная величина,  $z_n^0 = 0,2$  мм.

Как показали экспериментальные исследования при величине неравномерности снимаемого припуска менее 0,2 мм процесс обработки являлся устойчивым и подчинялся основным закономерностям, изложенным в работах В.П. Смоленцева и других авторов [3, 4]. В тех случаях, когда неравномерность припуска превышала значение контрольной величины, процесс носил стохастический характер и припуск считался переменным.

Попытка применить электрод-щётку для обработки деталей с переменным припуском, в частности, для зачистки сварного участка, удаления припуска с наплавленных деталей, снятия облоя и притупления острых кромок на деталях после литья (чугунные решётки) не дали положительных результатов. Наблюдалось снижение интенсивности обработки, резко возрастал износ инструмента, снижалась точность обработки.

Целью работы являлось исследование процесса обработки деталей, имеющих переменный припуск и создание эффективной технологии, обеспечивающей устойчивое протекание процесса.

Детали с переменным припуском получают различными способами: сварные узлы, штамповки, наплавленные поверхности, детали после черновой ЭЭО, после черновой обработки лезвийным инструментом, литые детали [5, 6].

Поверхностный слой сварных швов и деталей, восстановленных наплавленными процессами, характеризуется повышенной прочностью и твёрдостью [7]. Такие детали имеют большой перепад припуска. Например, для компенсации износа детали, слой наносимого покрытия по толщине должен значительно превышать величину износа. Так, чтобы компенсировать износ 0,3-0,5 мм, надо наплавить слой до 1,0-1,2 мм [8].

Поверхностный слой деталей, подвергшихся электроэрозионной обработке, вследствие воздействия высоких температур, возникающих в зоне обработки в результате выделения электрической энергии, также обладает повышенной прочностью и твёрдостью, а также значительной неравномерностью профиля. Литые детали имеют высокую твёрдость, в частности, при литье решёток из чугуна СЧ20 (ГОСТ 1412-85) на поверхности решёток получается отбеленный слой, который и обуславливает высокую твёрдость и прочность. Детали после черновой обработки лезвийным инструментом или детали, получаемые штамповкой, имеют значительную неравномерность припуска, что удорожает их последующую обработку. Детали, полученные перечисленными методами, характеризуются повышенной твёрдо-

стью и прочностью, большой величиной неравномерности припуска для последующей обработки, в результате чего чистовая обработка таких деталей затруднена.

Имеются различные методы обработки поверхностей с переменным припуском: обработка шарошками, шлифование абразивными кругами и абразивными лентами на эластичной основе, выглаживанием, лезвийным инструментом, иглофрезами, электрохимикомеханическим способом и т.д. [8, 9]. Но все они имеют недостатки, поэтому значительная часть деталей, имеющих переменный припуск обрабатывается с помощью зачистных устройств или слесарным методом. Трудоемкость зачистных ручных операций очень высока и в ряде случаев занимает до 40 % от общего времени изготовления изделия.

Наиболее полно из перечисленных методов обработке поверхностей с переменным припуском удовлетворяют металлические щётки [10-12], но и им свойственны следующие недостатки: большой износ и обусловленная им высокая стоимость; низкая производительность.

Заслуживает внимания способ электрохимикомеханической размерной обработки, разработанный В.П. Смоленцевым [13], но он недостаточно производителен. Способ анодно-механической обработки находит широкое применение при обработке напусков [6], однако область его использования ограничена.

Сопоставление рассмотренных методов показывает, что наиболее прогрессивным методом, позволяющим улучшать показатели обработки деталей с переменным припуском, является электрод-щётка. Однако попытка использования этого метода без доработки процесса не дает положительных результатов, так как одним из основных факторов, определяющих показатели процесса, является прижим электрода-щётки к обрабатываемой заготовке.

## 2 Результаты исследования

Обработка электродом-щёткой – комбинированный процесс, поэтому выбор рабочей среды производится исходя из воздействия электрохимической и электроэрозионной составляющих процесса (механическая не зависит от состава электролита) [14]. С учётом этого для обработки использовались следующие среды: 15-20 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  + 15 % масло «Индустриальное-20» и смесь 97 %  $\text{H}_2\text{O}$  с укринолом 3 %. На рисунке 2 показаны применяемые дисковые щётки, используемые для обработки корпусных деталей, кронштейнов, решёток и т.д. Для снятия припуска на внутренних поверхностях, где подвод инструмента ограничен размерами, обработки торцов, зачистки уступов используются торцовые щетки. Для обработки внутренних каналов применялись щётки-кисточки [15].

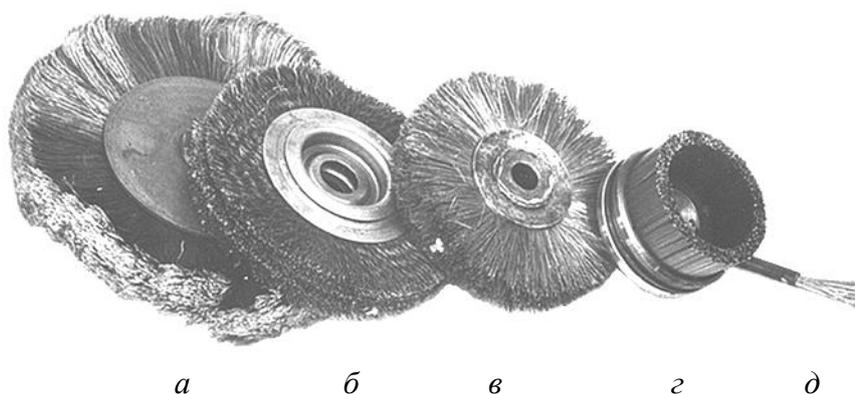


Рисунок 2 – Инструменты-щетки для обработки с наложением электрического поля

Дисковые электроды-щетки с проволочной рабочей частью изготавливаются из меди (рис. 2, а), стали (рис. 2, б), латуни (рис. 2, в). Торцовые электроды изготавливаются в виде торцевой электрод-щетки (рис. 2, г) электрода-кисточки (рис. 2, д).

На рисунке 3 представлена опытная установка, изготовленная на базе плоскошлифо-

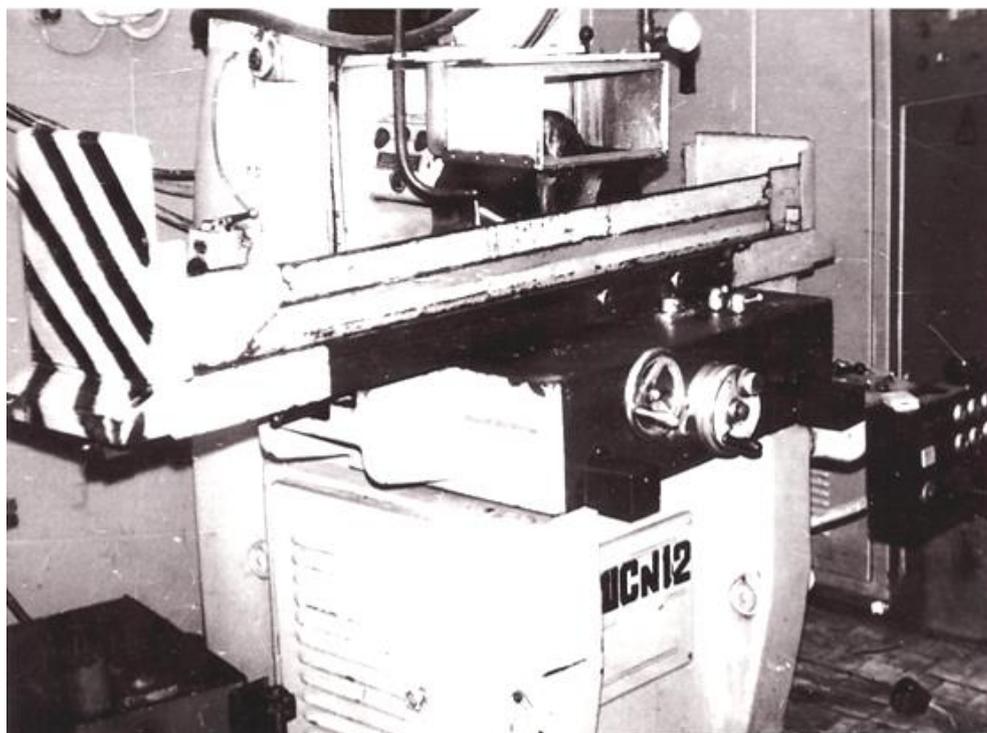


Рисунок 3 – Установка для комбинированной обработки электродом щеткой

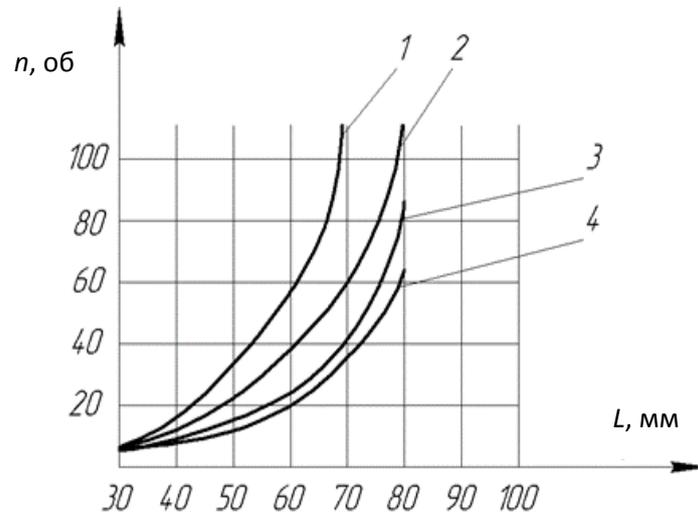
вального станка ЗГ71 [16]. В состав её входит модернизированный станок ЗГ71, источник питания ИПТУ 1600 / 12, пульт управления, ёмкость для хранения электролита, насосная станция типа ПА-45.

Рассмотрим механизм обработки электродом-щеткой поверхностей с переменным припуском. При подходе проволоочки к обрабатываемой поверхности происходит только процесс анодного растворения материала. По мере приближения проволоочки к заготовке увеличивается напряженность электрического поля и при достижении максимального зазора происходит пробой межэлектродного промежутка, в результате чего осуществляется расплавление металла и удаление его с заготовки. В результате пробоя межэлектродного промежутка происходит микровзрыв, вследствие чего проволоочка отклоняется от заготовки. Здесь возможны два варианта протекания процесса:

1 Проволочка выпрямляется в процессе вращения щетки, в это время осуществляется анодное растворение. Выпрямляясь проволоочка приближается к заготовке, при этом успевает закончиться время деионизации, после чего следует разряд. Это эрозионно-химическая обработка, использование её целесообразно для чистовых операций.

2 Время деионизации не успевает закончиться, т.е. промежуток не успевает восстановить свои свойства, вследствие чего происходит механическое воздействие проволоочки на заготовку, в результате чего процесс приобретает высокую производительность, но одновременно и высокую интенсивность изнашивания инструмента.

Для расчёта величины и времени отклонения проволоочки были разработаны алгоритм и программа [17]. На рисунках 4-7 приведены графические зависимости времени отклонения проволоочки от технологических параметров процессов. За время  $t$  проволоочка может совершить в зависимости от условий, скорости диска и других факторов до нескольких десятков оборотов. На рисунке 4 показано влияние длины проволоочки при всех остальных неизменных показателях на количество оборотов проволоочки до полного выпрямления после разряда. Для подтверждения изложенного было проведено осциллографирование процесса с помощью шлейфового осциллографа К-12-22. Данные осциллограммы полностью подтверждают результаты расчетов, приведенных в работе [17].



1 – 2240 об/мин; 2 – 1500 об/мин; 3 – 1200 об/мин; 4 – 1000 об/мин

Рисунок 4 – Зависимость количества оборотов электрода-щеткой  $n$  до распрямления проволочки после разряда от ее длины  $L$

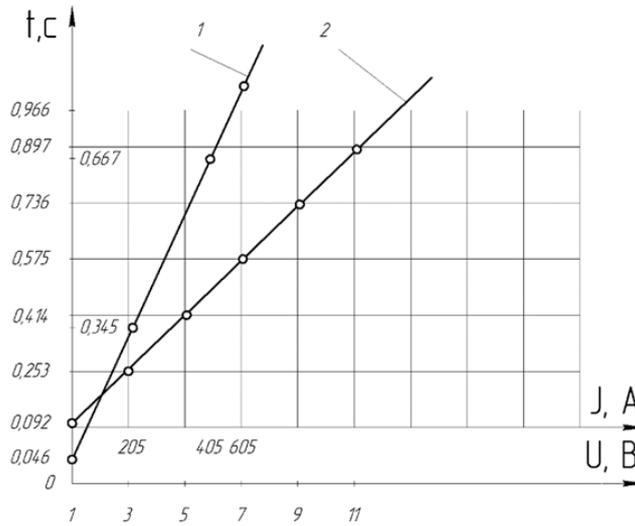


Рисунок 5 – Зависимость времени отклонения проволочки от среднего значения силы тока (1) и напряжения (2)

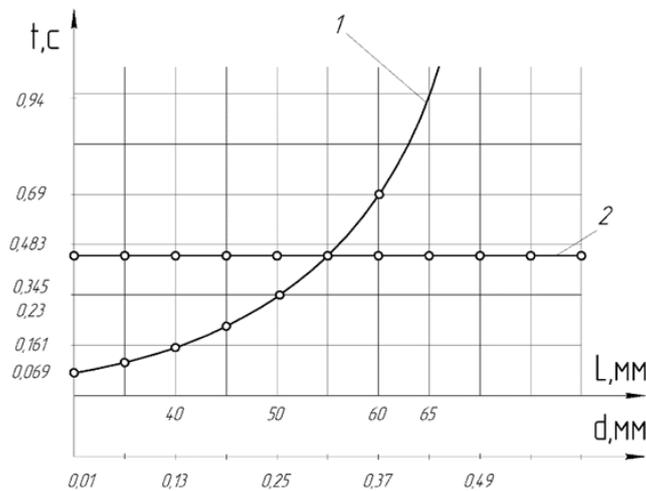


Рисунок 6 – Зависимость времени отклонения проволочки от ее длины (1) и диаметра (2)

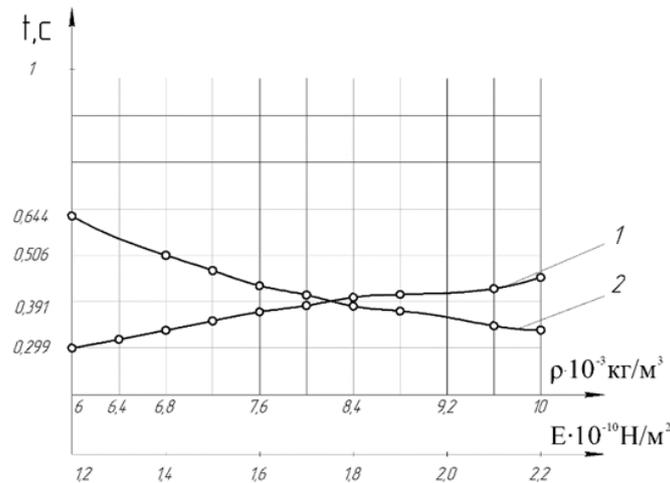


Рисунок 7 – Зависимость времени отклонения проволоочки от плотности материала (1) и модуля упругости (2)

В результате теоретических исследований [17-20] и осциллографирования процесса установлено: в отличие от ранее принятых механизмов, при которых принималось, что каждая проволоочка за оборот имеет хотя бы один импульс разряда с деталью, что приводило к завышенным расчетным результатам по съему металла, показано теоретически и подтверждено экспериментально, что после разряда каждая проволоочка в пучке может совершать в зависимости от материала, диаметра и угловой скорости диска до нескольких десятков оборотов. Это позволяет теоретически установить истинную величину съема при обработке электродом-щеткой и более точно установить ее износ.

Формулы для определения механической и электроэрозионной составляющей процесса показаны ниже. Механическая составляющая определяется по формуле:

$$M = \rho_n \cdot Z \cdot L \cdot \delta \cdot \rho_M, \quad (2)$$

где  $\rho_n$  – коэффициент контакта инструмента с деталью;  $Z$  – длина обрабатываемой поверхности;  $L$  – ширина обрабатываемой поверхности;  $\delta$  – припуск;  $\rho_M$  – плотность обрабатываемого материала.

Время, необходимое на снятие припуска с заготовки, определяется из зависимости

$$\delta(t) = -\Delta l + C_e^{c \cdot t}$$

Величина  $C$  определяется из начального условия:

$$\delta(0) = \delta_0,$$

$$C = \delta + \Delta l,$$

$$t = \frac{1}{c_0} \ln \frac{\Delta l}{\Delta l + \delta_0}. \quad (3)$$

Электроэрозионная составляющая процесса обработки определяется по формулам [4]:

$$M_{\text{эзо}} = \frac{(W^2 \tau_{\Pi} - \pi \Pi) n}{2 g_{\text{ж}} W_j}, \quad (4)$$

где  $W$  – мощность разряда;  $g_{\text{ж}}$  – теплоемкость жидкого сплава;  $\Pi$  – критерий Палатника :  $\Pi = c j \lambda T^2$ ;  $c$  – теплоемкость сплава;  $j$  – плотность сплава;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $T_{\Pi}$  – приведенная температура плавления сплава;  $\tau_{\Pi}$  – время действия импульса.

Электрохимическая составляющая процесса:

$$M_{\text{эхо}} = \frac{A^* U S}{(R + a_n) - \sqrt{R^2 - V_{\text{свщ}}^2 \tau^2 + y_c(\tau)}}, \quad (5)$$

где  $A^* = \alpha(\alpha/j)\eta c$ ;  $\alpha$  – электрохимический эквивалент;  $\alpha$  – электропроводность электролита;  $\eta$  – выход по току;  $j$  – плотность обрабатываемого материала;  $C$  – жесткость пучка проволоки;  $R$  – радиус электрода-щетki;  $a_n$  – длина проволочки щетки  $V_{свщ}$  – скорость точки  $C$ , находящейся на периферии щетки при встречной обработке;  $\tau$  – момент времени обработки.

При использовании величины  $\eta$  учитываем:

$$\eta = \frac{I_{эф}}{I_{затр}}$$

$$\hat{i} = nFkc_R^{АДС} \exp\left(-\frac{\Delta\hat{j}}{RT}\right), \quad (6)$$

где  $n$  – концентрация электролита;  $F$  – число Фарадея;  $\Delta\hat{j}$  – изменения энергии Гибса;  $R$  – газовая постоянная;  $c_R^{АДС}$  – концентрация реагирующих веществ в адсорбированном состоянии;  $T$  – температура электролита.

При определении электрохимической (ЭХ) составляющей надо иметь в виду то, что реальные скорости процесса выше, чем расчётные. Это происходит за счёт того, что в процессе реакции на катоде выделяется водород  $H_2$ , а на аноде – кислород  $O_2$ , что приводит к значительному увеличению температуры, что, в свою очередь, способствует увеличению скорости обработки. На рисунке 8 приведена электрическая схема замещения тепловых потоков.

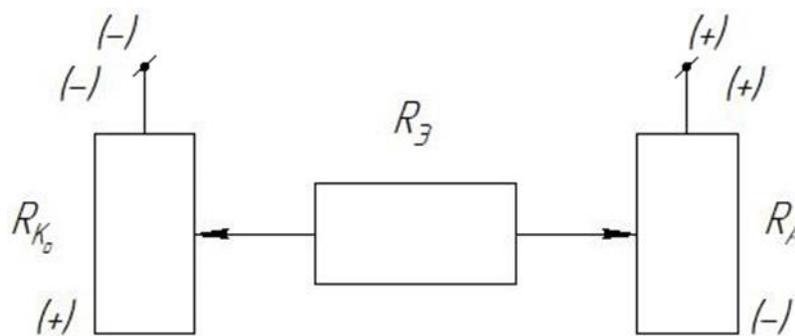


Рисунок 8 – Эквивалентная электрическая схема замещения тепловых потоков

Истинная величина электропроводности определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{Q}{0.24[U_{ист} - (E_K - E_A)]^2 t}, \quad (7)$$

где  $U_{ист}$  – напряжение источника питания;  $E_K$  – потенциал катода;  $t$  – время обработки;  $Q$  – выделяющаяся тепловая энергия.

Общий съём материала определяется как сумма всех трёх составляющих процесса с учётом коэффициента взаимного влияния составляющих процесса  $K_v$  друг на друга, в результате чего значительно может возрасти производительность.

Общий объём металла при комбинированной обработке электродом-щеткой поверхностей с переменным припуском составит:

$$M_{общ} = K \left( \rho_n * \zeta * L * Z * \rho_M + \frac{W^2 \tau_n - \pi \Pi) n}{2g_{ж} W j} + \frac{A^* U S}{(R + a_n) - \sqrt{R^2 - V_{свщ}^2 \tau^2 + y_c \tau}} \right), \quad (8)$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий степень взаимного влияния составляющих процесса обработки, равный значениям: для сталей – до 30; для чугуна – до 25.

В результате исследований получены экспериментальные зависимости. В связи с тем,

что обработка чугунных деталей наименее исследована, рассмотрим обработку поверхностей с переменным припуском на их примере [17]. На рисунке 9 показана разбивка по времени удаления припуска. Из анализа рисунка 9 видно, что припуск с начальным коэффициентом неравномерности  $K_n$  до 5 удаляется в первые 10 секунд обработки поверхности, процесс удаления припуска с начальным коэффициентом неравномерности  $K_n$  до 10 и скругления острых кромок с радиусом 1 мм занимает до 40 секунд.

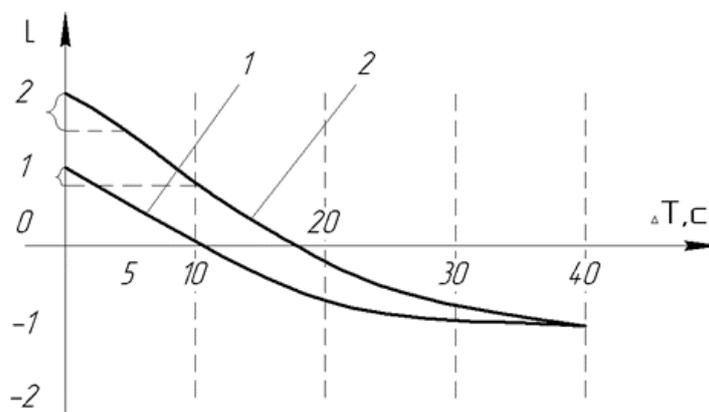
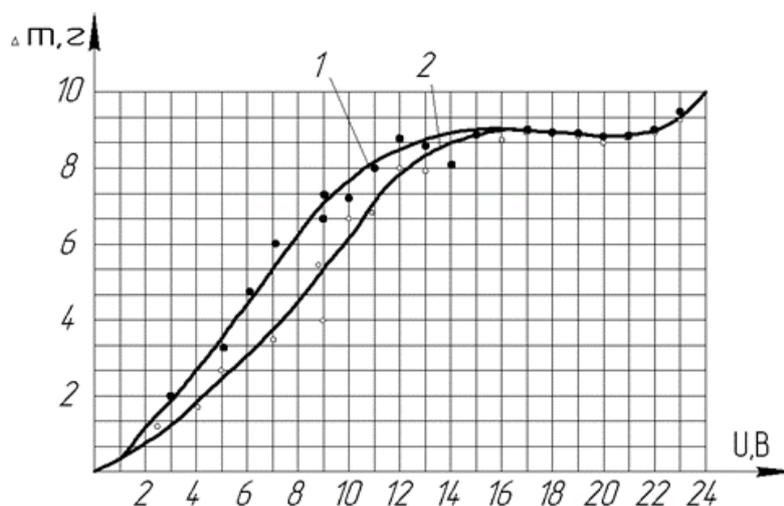


Рисунок 9 – Зависимость съема металла с обрабатываемой поверхности от времени для изделий с разным коэффициентом неравномерности

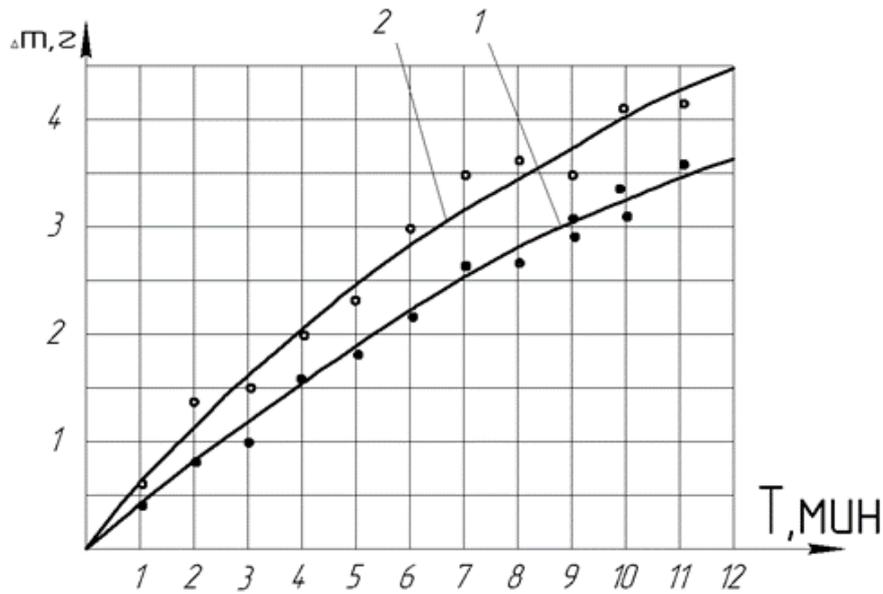
На рисунке 10 показано влияние напряжения на съем материала, из анализа которого можно сделать вывод, что независимо от материала обрабатываемой заготовки и инструмента рост производительности наблюдается при увеличении напряжения до 14-15 В, затем процесс стабилизируется.



1 – обработка заготовок с переменным припуском;  
2 – обработка заготовок с постоянным припуском

Рисунок 10 – Влияние напряжения на съем металла с обрабатываемой поверхности

На рисунке 11 показаны результаты исследования съема материала при обработке по 2-ой схеме от времени: 1 – съем чугуна щеткой из стали I2XI8NI0T с набивкой 0,5, диаметром проволоки 0,3 мм, прижимом 1 мм, напряжением 4 В. Из анализа полученных результатов следует, что с увеличением длительности обработки съем металла возрастает независимо от вида снимаемого припуска.

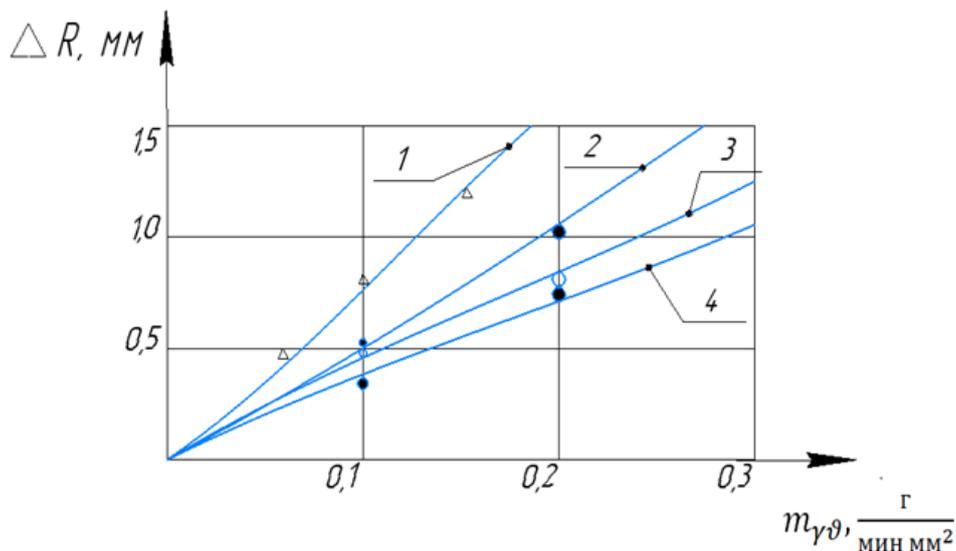


- 1 – обработка заготовок с переменным припуском;
- 2 – обрабатывались поверхности с постоянным припуском

Рисунок 11 – Влияние времени обработки на съем металла с обрабатываемой поверхности

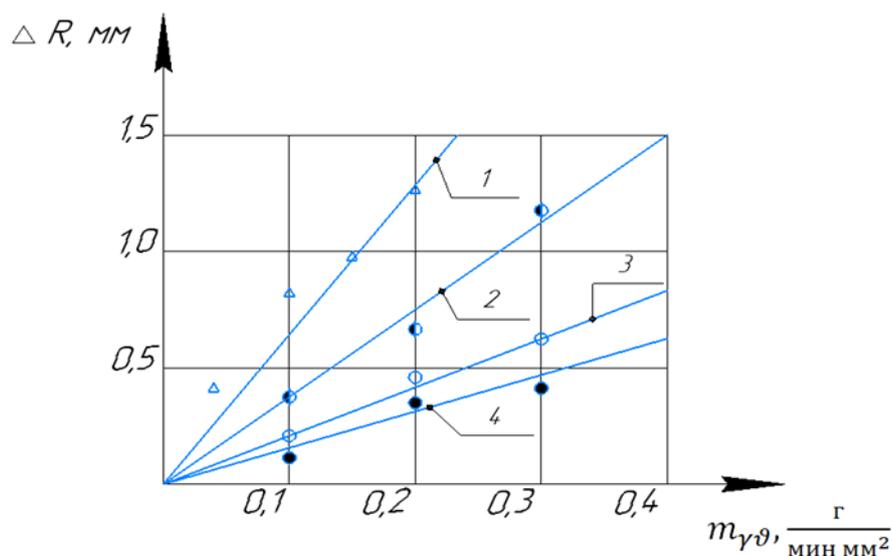
Зависимости износа электрода-щетki (ЭЩ) от съема металла с обрабатываемой поверхности при различном сечении проволочек и различных материалах щетки, а также от времени обработки приведены на рисунках 12-13.

Из анализа рисунков 12 и 13 следует, что при увеличении удельного съема металла с заготовки износ электрода-щетki увеличивается. Щетки с рабочей частью из проволочек с меньшим диаметром и из меди имеют несколько большую износостойкость, чем щетки из латуни и стали.



- 1 – поверхность с переменным припуском,  $d_{пр} = 0,32$  мм;
- 2, 3, 4 – поверхность с постоянным припуском,  $d_{пр} = 0,63; 0,32; 0,17$  мм соответственно

Рисунок 12 – Зависимость уменьшения радиуса ЭЩ от удельного съема металла при различных диаметрах проволочек  $d_{пр}$  щетки



1 – обработка поверхности с переменным припуском, щетка из стали 12Х18Н10Т;  
 2, 3, 4 – обработка поверхности с постоянным припуском щетками  
 из стали, бронзы, меди (соответственно)

Рисунок 13 – Зависимость уменьшения радиуса ЭЩ от удельного съема металла для различных материалов щетки

На рисунке 14 показана опытно-промышленная установка, специально изготовленная для комбинированной обработки чугунных решеток. Включает в себя: спроектированную установку, пульт управления, насосную станцию типа ПА-90, емкость для рабочей среды на 100 литров, источник питания ТВР-3150/24. Зона обработки установки показана на рисунке 15. Для обработки заготовок был изготовлен специальный инструмент-щетка из стальной проволоки 12Х18Н10Т (рис. 16). Длина щетки равнялась длине решетки и за один проход полностью обрабатывала ее. Щетка набиралась из дисков шириной 20 мм.

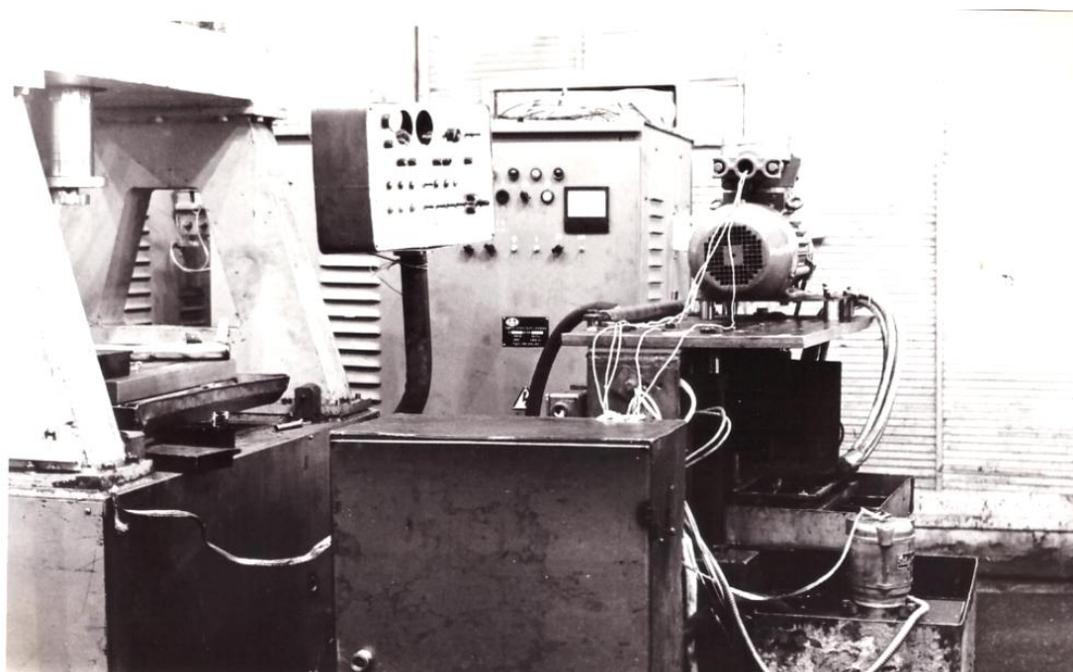


Рисунок 14 – Опытно-промышленная установка

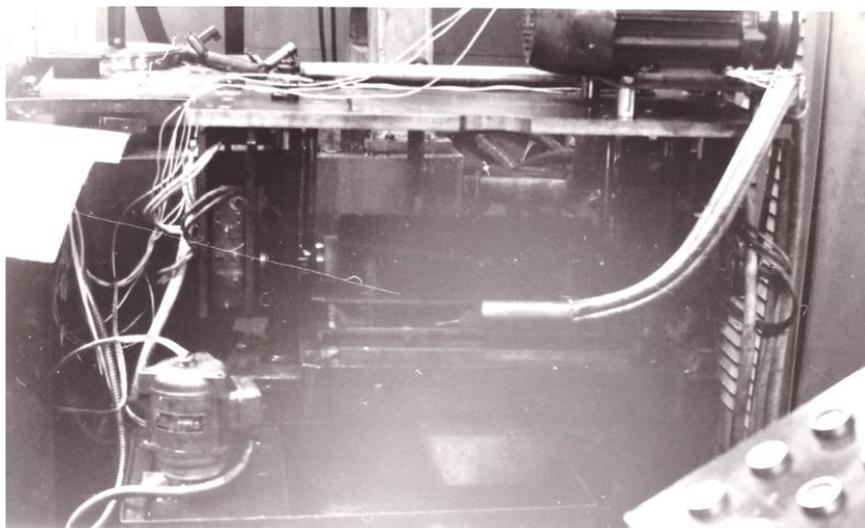


Рисунок 15 – Зона обработки опытно-промышленной установки

Технические характеристики установки:  
Максимальная сила тока, А – 2000  
Напряжение, В – 0-20  
Частота вращения вала, об/мин – 2240  
Диаметр инструмента, мм – 150-250  
Подача рабочей среды, л/мин – 90

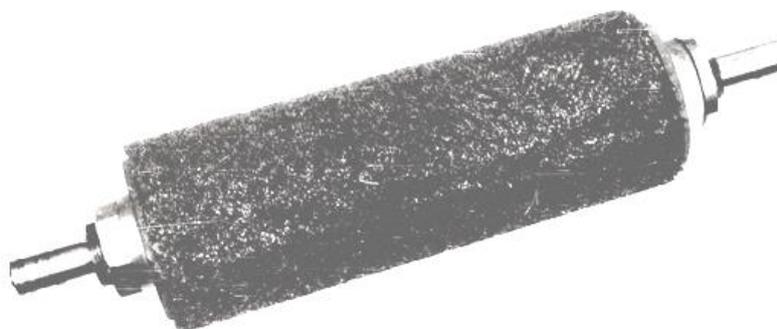


Рисунок 16 – Инструмент электрод-щетка для зачистки литых крупногабаритных деталей с неравномерным припуском

Параметры электрода-щетчи: длина, мм – 450; диаметр, мм – 150; диаметр проволочек, мм – 0,45; материал проволочек – нержавеющая сталь 12Х18Н10Т; щетка набиралась из секций шириной 15 мм.

На основе полученных результатов исследований разработан типовой технологический процесс, обеспечивающий получение заданного качества поверхности и высокой производительности при минимальном расходе инструмента. Алгоритм проектирования технологического процесса обработки поверхностей с переменным припуском электродом-щеткой приведен на рисунке 17.

Проволока для пучка электрода-щетчи рассчитывается по формуле:

$$n = K_p \cdot \frac{D^2}{d^2}, \quad (9)$$

где  $D$  – диаметр пучка;  $d$  – диаметр проволоки;  $K_p$  – коэффициент, учитывающий положение

проволоки в пучке;  $N$  – количество пучков в инструменте-щетке определяется по формуле:

$$N = \frac{\pi D_q}{D} K_3, \quad (10)$$

где  $D_q$  – наружный диаметр щетки;  $K_3$  – коэффициент, учитывающий расположение проволочек при закреплении,  $K_3 = 0,85-0,95$ .

На основе проведенных исследований выбраны технологические режимы обработки поверхностей с переменным припуском. Выяснено, что в зависимости от конструкции детали, материала, технологических требований выбирается схема обработки и в зависимости от нее назначаются режимы обработки. Так, получены следующие режимы для обработки по схеме с регулированием по минимальному значению припуска: напряжение – 9-15 В; прижимное расстояние щетки к заготовке – 1,0-2 мм; диаметр проволочек щетки – 0,45-0,8 мм; подача щетки диаметром 60 мм – 1 м/мин. При обработке по схеме с регулированием по максимальному значению припуска режимы следующие: напряжение – 5-9 В, прижимное расстояние щетки к заготовке – 0,05-0,5 мм; диаметр проволочек щетки – 0,1-0,4 мм, подача щетки с диаметром 10 мм – 20 м/мин. Все режимы для обоих схем регулирования приведены в таблицах 1 и 2.

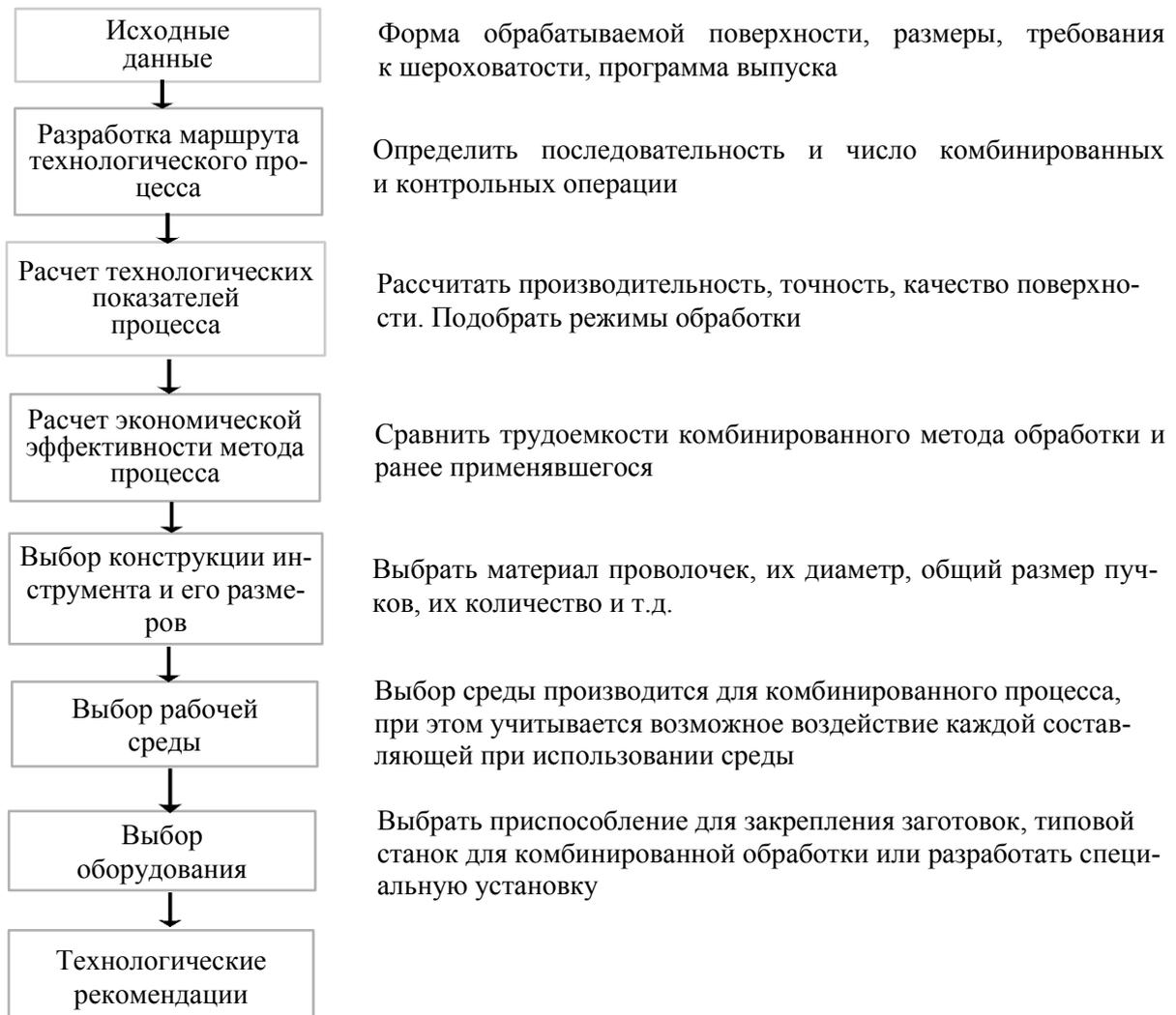


Рисунок 17 – Схема проектирования процесса комбинированной обработки

Таблица 1 – Режимы обработки поверхностей электродом-щеткой по схеме, регулируемой по минимальному значению припуска

Наименование показателя	Значение
Напряжение, В	9-15
Прижим щетки в заготовке, мм	1,0-2,0
Скорость вращения щетки, м/с	Не менее 8
Диаметр щетки, мм	150-250
Диаметр проволоочки, мм	0,45-0,8
Скорость перемещения стола, мм/мин	60-1м
Движение заготовки	Встречное
Время обработки	От размеров заготовки

Таблица 2 – Режимы обработки поверхностей электродом-щеткой по схеме, регулируемой по максимальному значению припуска

Наименование показателя	Значение
Напряжение, В	5-9
Прижим щетки в заготовке, мм	0,05-0,5
Скорость вращения щетки, м/с	10-25
Диаметр щетки, мм	200-350
Диаметр проволоочки, мм	0,1-0,4
Скорость перемещения стола, мм/мин	0,10-20
Движение заготовки	Попутное
Время обработки	От размеров заготовки

Рассмотрены возможные схемы обработки поверхностей с переменным припуском, таблица 3.

Схемы обработки, представленные в таблице 3, имеют следующие особенности:

1 схема – с регулированием прижима заготовки по максимальному значению припуска обладает меньшей производительностью по сравнению со второй схемой, но характеризуется значительно меньшим износом инструмента и более высоким качеством обработки;

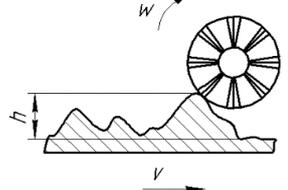
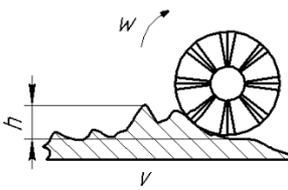
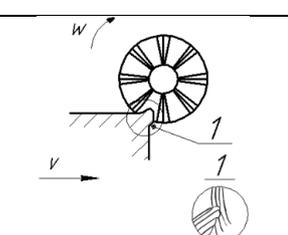
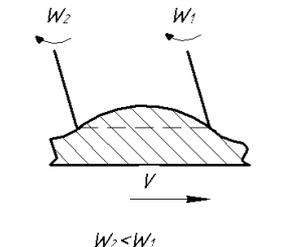
2 схема – с регулированием по минимальному значению припуска характеризуется высокой производительностью (поверхности с  $K_n$  до 18 обрабатываются за 30-40 секунд), но сопровождаются высокой интенсивностью износа инструмента – целесообразна для использования в случае, если необходимо быстро обработать заготовку;

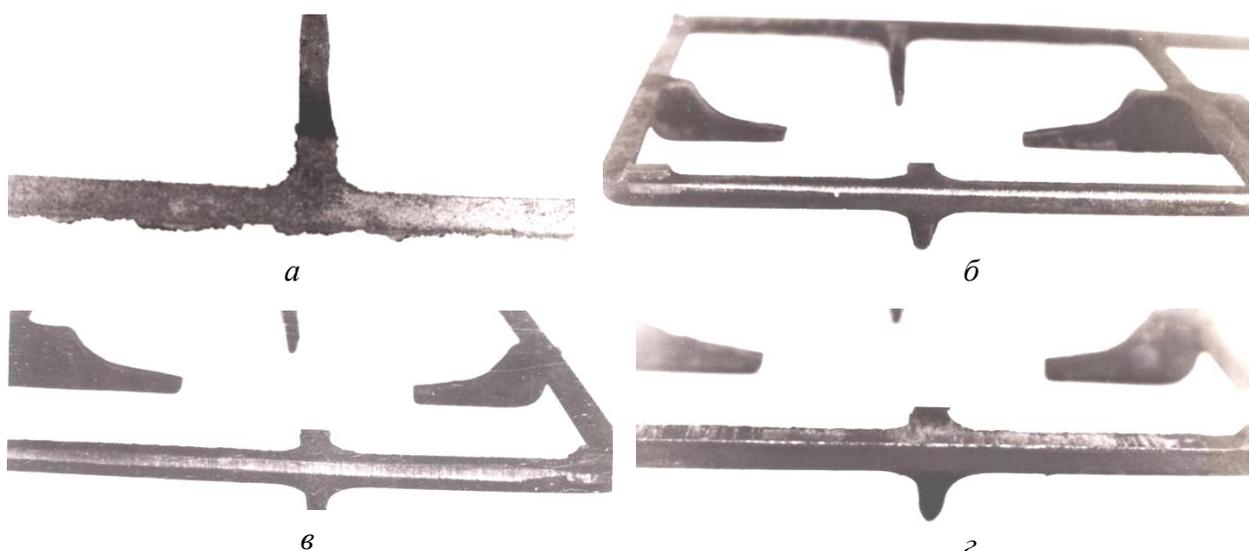
3 схема – разновидность 2 схемы, когда поверхности, имеющие острые кромки, обрабатываются с большим прижимом – характеризуется высоким износом инструмента за счет отсечки концов проволочек;

4 схема – вторая разновидность 2 схемы – когда обрабатываются поверхности с большим прижимом и малой местной скоростью движения проволоочки. Возможен вырыв всей проволоочки и приваривание ее к обрабатываемой поверхности. Эту схему целесообразно использовать для нанесения покрытий и легирования.

Образцы обработанных по разным схемам чугунных решеток представлены на рисунках 18-21. Рисунок 18 соответствует случаю до обработки поверхности, рисунок 19 – после 30 сек. обработки по 2-ой схеме, рисунок 20 – после 5 мин. обработки по 2-ой схеме и рисунок 21 – после 1 мин. 30 сек. обработки по первой схеме.

Таблица 3 – Схемы обработки электродом-щеткой поверхностей с переменным припуском и возможности их использования

Способ обработки	Схема обработки	Преимущества	Недостатки	Область использования
1. Схема обработки с регулированием прижима щетки по максимальному значению припуска		Высокое качество поверхности	Недостаточно высокая производительность	Чистовые операции
2. Схема обработки с регулированием прижима щетки по минимальному значению припуска		Высокая производительность	Возможны прижоги и микротрещины поверхности. Высокий износ инструмента	Черновые операции
3. Схема обработки поверхности с острыми кромками			Высокий износ инструмента	Экономически не выгодно использовать
4. Схема обработки заготовок с большим прижимом и малой скоростью движения		Высокая производительность	Значительный износ инструмента	Для легирования поверхности, нанесения на них специальных покрытий



а – до обработки; б – после 30 секунд обработки по первой схеме; в – после 5 минут обработки по первой схеме; г – после 1,5 минут обработки по второй схеме

Рисунок 18 – Решетка литая чугунная до и после обработки

Наиболее качественная зачистка граней литой чугуновой решетки реализуется по первой схеме. Износ электрода-щеткой при этом ниже, но ниже и производительность обработки, чем при зачистке граней решетки по второй схеме.

### 3 Обсуждение и заключение

1 Исследован механизм обработки токопроводящих материалов электродом-щеткой при высокой величине неравномерности исходного припуска. В основу механизма положено автоколебательное движение пучков проволоки при произвольном рельефе заготовки. Предлагаемый механизм позволяет оптимизировать величину прижима пучков к детали для различных сочетаний материалов инструмента и заготовки.

2 Разработан типовой технологический процесс, обеспечивающий получение заданного качества поверхности и высокой производительности при минимальном расходе инструмента. Предложены два варианта регулирования технологического процесса в зависимости от припуска и требований к качеству поверхности после обработки: по максимальному и минимальному начальному припуску.

3 Впервые изучены технологические показатели при обработке электродом-щеткой литых деталей, имеющих слой отбеленного чугуна. Установлено, что ранее принятые для сталей режимы применительно к чугуну должны быть скорректированы с учетом рекомендаций, приведенных в статье.

4 Спроектирована и изготовлена опытно промышленная установка для обработки переходных участков каналов и литых деталей из чугуна. Опытно-промышленная эксплуатация установки в условиях завода подтвердила правомерность теоретических разработок и эффективность для производства способа обработки деталей с переменным припуском электродом-щеткой.

5 Для комплектации установки впервые разработаны и изготовлены секционные сборные инструменты из унифицированных блоков, позволяющие выполнять обработку крупногабаритных деталей сложного профиля за 1-2 технологических перехода, что на порядок меньше, чем при существующем процессе, а также резко снизить расход материала на инструмент за счет замены только изношенных блоков.

### Список литературы

1 Смоленцев В. П. Износ электрода – щетки при обработке поверхностей с переменным припуском / В. П. Смоленцев, О. Н. Кириллов, Н. А. Тюкачев / Воронеж, ВГТУ, 1996. 15 с. Деп. в МИВИ № ДО 8684 24.10.1996.

2 Юриков Ю. В. Комбинированное электроэрозионно-гальваническое восстановление деталей машин / Ю. В. Юриков, Б. П. Саушкин // Нетрадиционные технологии в машиностроении и приборостроении : межвуз. сб. науч. тр. Воронеж : ВГТУ, 1999. – Вып. 3. – С. 46-53.

3 Смоленцев В. П. Обработка деталей проволочным катодом / В. П. Смоленцев, Б. А. Бушуйкин, Н. П. Дунаев // Электронная обработка материалов. – 1976. – № 3. – С. 89-91.

4 Смоленцев В. П. Нежесткий электрод – щетка для чистовой обработки металлов / В. П. Смоленцев, В. Ю. Черепанов, О. Н. Кириллов // Рациональная эксплуатация и инструментальнообслуживание станков с ЧПУ и ГПС : тез. докл. зональной конф. Пенза : ППИ, 1989. – С.38-39.

5 Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / Под ред. А. Г. Суслова М. : Машиностроение, 2001.

6 Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / под общ. ред. Волосатова В. А. Л. : Машиностроение, 1988. – 719 с.

7 Справочник мастера по чугунному литью / Под ред. Н. Г. Гиришова. – ГНТИ. 1953. – 552 с.

- 8 Молодык Н. В., Зенин А. С. Восстановление деталей машин. Справочник. – М. : Машиностроение, 1989. – 480 с.
- 9 Макаров В. Ф. Метод автоматизированного скругления и полирования острых кромок деталей газотурбинных двигателей абразивно-полимерными щетками / В. Ф. Макаров, А. В. Виноградов // Вопросы вибрационной технологии : межвуз. сб. науч. ст. Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2010. С. 25-31.
- 10 Перепичка Е. В. Очистно-упрочняющая обработка изделий щетками. М. : Машиностроение, 1989. 136 с.
- 11 Серебrenицкий П. П. Обработка деталей механическими щётками. Л. : Лениздат 1967. – 152 с.
- 12 Кургузов Ю. И. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя закаленных деталей обработкой механическими щетками : дис. канд. техн. наук / Ю. И. Кургузов. Куйбышев, 1981. – 234 с.
- 13 Авторское свидетельство № 663518 СССР, МКИ2 В23 Р 1 / 04. Способ электрохимикомеханической обработки / В. П. Смоленцев, В. С. Примак. (СССР). – 2 с.
- 14 Кириллов О. Н. Выбор параметров рабочих сред при комбинированной обработке электродом-щеткой / О. Н. Кириллов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел. 2010. – № 6 (284). – С. 90-98.
- 15 Кириллов О. Н. Инструмент для зачистки сварных швов / О. Н. Кириллов // Нетрадиционные технологии в машиностроении и приборостроении : межвуз. сб. науч. тр. Воронеж, 1998. – Вып. 2. – С. 33-37.
- 16 Кириллов О. Н. Разработка оборудования для высокоскоростной обработки непрофилированным электродом-щеткой / О. Н. Кириллов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т.6. – № 1. – С. 20-22.
- 17 Кириллов О. Н. Технология комбинированной обработки непрофилированным электродом: монография / О. Н. Кириллов. Воронеж : ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2010. – 254 с.
- 18 Писарев А. В. Управление технологическими показателями обработки электродом-щеткой / А. В. Писарев // Нетрадиционные методы обработки : сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. Воронеж. – 2002. – С. 22-31.
- 19 Новые реальности применения систем автоматизированного проектирования для изготовления перспективных изделий / О. О. Шендрикова, С. С. Юхневич, А. А. Витковская, А. К. Севостьянов // Качество в производственных и социально-экономических системах : сб. науч. тр. 8-й Междун. науч.-техн. конф., Курск, 17 апреля 2020 года. – Курск : ЮЗГУ, 2020. – С. 447-454. – EDN CQUWLF.
- 20 Gillespie LaRoux K. 2004. Leaders Who Have Made a Difference in Deburring. Proceedings of the 7th International Deburring and Surface Finishing Conference. Berkeley, California: June 9.

## References

- 1 Smolentsev V. P. Wear of the brush electrode when processing surfaces with variable allowance / V. P. Smolentsev, O. N. Kirillov, N. A. Tyukachev / Voronezh, VSTU, 1996. 15 p. Dep. in MIVI № 8684 24.10.1996.
- 2 Yurikov Yu. V. Combined electroerosion-galvanic restoration of machine parts / Yu. V. Yurikov, B. P. Saushkin // Unconventional technologies in mechanical engineering and instrument engineering : inter-university collection of scientific tr. Voronezh : VSTU, 1999. Issue 3. pp. 46-53.
- 3 Smolentsev V. P. Processing of parts with a wire cathode / V. P. Smolentsev, B. A. Bushuikin, N. P. Dunaev // Electronic processing of materials. – 1976. – № 3. – pp. 89-91.
- 4 Smolentsev V. P. Non-rigid electrode – brush for finishing metalworking / V. P. Smolentsev, V. Yu. Cherepanov, O. N. Kirillov // Rational operation and tool maintenance of CNC

and GPS machines : tez. dokl. zonal conf. Penza : PPI, 1989. – pp. 38-39.

5 Handbook of a technologist-machine builder : in 2 volumes / Edited by A. G. Suslov M. : Mechanical Engineering, 2001.

6 Handbook of electrochemical and electrophysical processing methods / under the general ed. Volosatova V. A. L. : Mechanical Engineering, 1988. – 719 p.

7 Handbook of the master of cast iron casting / Edited by N. G. Girshovich. – GNTI. 1953. – 552 p.

8 Molodyk N. V., Zenin A. S. Restoration of machine parts. Handbook. – M. : Mechanical Engineering, 1989. – 480 p.

9 Makarov V. F. Method of automated rounding and polishing of sharp edges of gas turbine engine parts with abrasive polymer brushes / V. F. Makarov, A. V. Vinogradov // Questions of vibration technology : inter-university. collection of scientific. Rostov-on-Don : DSTU, 2010. – pp. 25-31.

10 Perepichka E. V. Clean – hardening treatment of products with brushes. Moscow : Mashinostroenie, 1989. – 136 p.

11 Serebrenitsky P. P. Processing of parts with mechanical brushes. L. : Lenizdat 1967. – 152 p.

12 Kurguzov Yu. I. Technological quality assurance of the surface layer of hardened parts by processing with mechanical brushes : dis. Candidate of Technical Sciences / Yu. I. Kurguzov. Kuibyshev, 1981. – 234 p.

13 Copyright certificate № 663518 of the USSR, MKI2 B23 P 1 / 04. Method of electrochemical and mechanical processing / V. P. Smolentsev, V. S. Primak. (USSR). – 2 p.

14 Kirillov O. N. The choice of parameters of working media during combined electrode-brush treatment / O. N. Kirillov // Fundamental and applied problems of engineering and technology. Eagle. – 2010. – № 6 (284). – pp. 90-98.

15 Kirillov O. N. Tool for stripping welds / O.N. Kirillov // Unconventional technologies in mechanical engineering and instrumentation : mezhvuz. sb. scientific tr. Voronezh, 1998. Issue. 2. – pp. 33-37.

16. Kirillov O. N. Development of equipment for high-speed processing with an unprofiled electrode brush / O. N. Kirillov // Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2010. – Vol.6. – № 1. – pp. 20-22.

17 Kirillov O. N. Technology of combined processing with an unprofiled electrode : monograph / O. N. Kirillov. Voronezh : State Educational Institution "Voronezh State Technical University", 2010. – 254 p.

18 Pisarev A. V. Management of technological indicators of processing with an electrode brush / A. V. Pisarev // Non-traditional methods of processing : collection of tr. international scientific and technical. conf. Voronezh, 2002. – pp. 22-31.

19 New realities of the use of computer-aided design systems for the manufacture of promising products / O. O. Shendrikova, S. S. Yukhnevich, A. A. Vitkovskaya, A. K. Sevostyanov // Quality in production and socio-economic systems : collection of scientific tr. 8th International Scientific-Technical. conf., Kursk, April 17, 2020. – Kursk : South State University, 2020. – pp. 447-454. – EDN KUVLF.

20 Gillespie Larue K. 2004. Leaders who have contributed to deburring. Proceedings of the 7th International Conference on Deburring and Surface Finishing. Berkeley, California: June 9.

©Кириллов О.Н., Куц В.В., Шендрикова О.О., 2022