



**ОТДЕЛОЧНО-ЗАЧИСТНАЯ
ОБРАБОТКА ПЕРЕХОДНЫХ
УЧАСТКОВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Смоленцев Владислав Павлович,
профессор кафедры технологии
машиностроения, д.т.н., профессор,
Воронежский государственный технический
университет, г. Воронеж, (РФ)

✉¹**Смоленцев Евгений Владиславович**,
профессор кафедры технологии
машиностроения, д.т.н., профессор,
Воронежский государственный технический
университет, г. Воронеж, (РФ)
e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

Золототрубова Юлия Сергеевна
старший преподаватель кафедры графики,
конструирования и информационных
технологий в промышленном дизайне,
Воронежский государственный технический
университет, г. Воронеж, (РФ)

Грицюк Василий Григорьевич
заведующий кафедрой технологии
машиностроения, к.т.н., Воронежский
государственный технический университет,
г. Воронеж, (РФ)

Аннотация.

В статье рассматриваются методы отделочно-зачистной обработки, в том числе, проектирование электрохимического процесса обработки. Показаны особенности различных схем использования электродов-инструментов, позволяющих достичь необходимых качественных показателей при обеспечении высокой производительности.

Ключевые слова: КОМБИНИРОВАННАЯ
ОБРАБОТКА, ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ
ОБРАБОТКА, ТЕХНОЛОГИЯ, КАЧЕСТВО.

**FINISHING AND STRIPPING OF
TRANSITIONAL SECTIONS OF
MACHINE PARTS**

Smolentsev Vladislav Pavlovich
doctor of tech. sc., professor, department
«Engineering Technology», Voronezh State
Technical University, Voronezh, (RF)

✉¹**Smolentsev Evgeniy Vladislavovich**
doctor of tech. sc., professor, department
«Engineering Technology», Voronezh State
Technical University, Voronezh, (R F)
e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

Zolototrubova Yulia Sergeevna
assistant professor, department of graphics,
construction and information technology in
industrial design Voronezh State Technical
University, Voronezh, (RF)

Gritsyuk Vasily Grigorievich
head of the department «Engineering
Technology», cand. of tech. sc., Voronezh
State Technical University, Voronezh (RF)

Annotation.

The article discusses the methods of finishing and stripping, including the design of an electrochemical processing process. The features of various schemes of using electrodes- tools that allow achieving the necessary quality indicators while ensuring high productivity are shown.

Keywords: COMBINED PROCESSING,
ELECTROCHEMICAL PROCESSING,
TECHNOLOGY, QUALITY.

¹Автор для ведения переписки

1 Состояние исследования и актуальность работы

Качество, как его определяют действующие стандарты, – это «совокупность характеристик объекта, относящихся к его способности удовлетворять установленные и предполагаемые потребности». При производстве двигателей ракетно-космической техники к таким характеристикам, в первую очередь, относят долговечность (ресурс) и надежность. Долгие годы, пока отечественная наукоемкая продукция не имела конкурентов, затраты на обеспечение качества, в том числе и технологическими методами, не были существенной проблемой для производителей. Однако сейчас на рынке появляются альтернативные разработки жидкостных реактивных двигателей, которые стремятся максимально использовать возможности соотношения цена-качество своей продукции. Таким образом, задача обеспечения высоких потребительских характеристик продукции при минимизации себестоимости, является крайне важной в сложившейся ситуации, так как потеря доли рынка космических услуг, оценивающегося в десятки (а по некоторым данным – в сотни) миллиардов долларов в год, может нанести существенный ущерб как отдельным предприятиям, так и экономике страны в целом.

Одним из факторов снижения ресурса и надежности жидкостных ракетных двигателей является трещинообразование деталей, обусловленного наличием концентраторов напряжений, располагающихся на острых кромках и переходных участках между различными элементами деталей машин (рис. 1) [1].

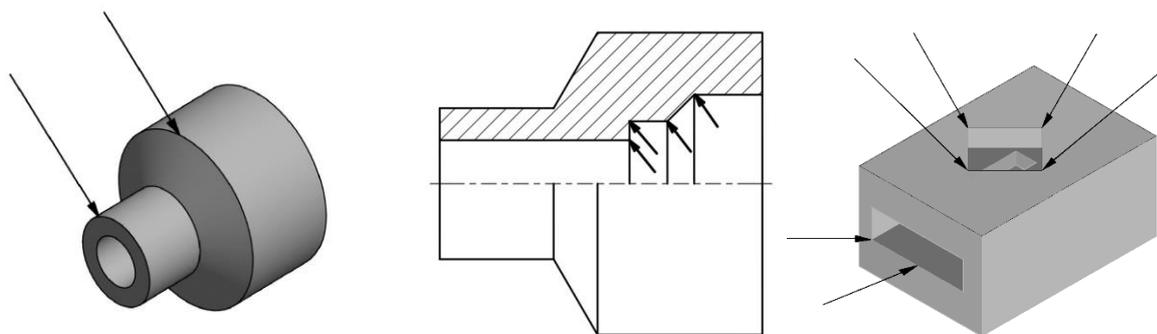


Рисунок 1 – Типовые детали, содержащие переходные участки и заусенцы

Другим фактором, который может оказать влияние на конечные показатели готовой продукции в ракетно-космической технике, является технологическая чистота обработанной поверхности, выражающаяся в отсутствии микрочастиц металла и заусенцев. Известно, что попадание подобных ликвидов в каналы и трубопроводы силовых установок может приводить к выходу из строя насосов, изменению характера течения и свойств рабочих жидкостей, что неизбежно снизит эксплуатационные характеристики механизмов вплоть до неприемлемых. Именно поэтому трудоемкость отделочно-зачистных операций в авиационно-космической отрасли может достигать 50 % от общего значения [2], что не может не влиять на себестоимость готовой продукции. Особенностью операций по скруглению кромок, удалению заусенцев является то, что они дают нужный эффект лишь тогда, когда обеспечивают стопроцентную зачистку обработанных поверхностей, поэтому при производстве особо ответственной техники специального назначения стремятся избегать ручных слесарных операций для решения подобных задач, так как человеческий фактор значительно умножает имеющиеся риски возникновения брака. На рисунке 2 показаны результаты исследований [2] по отказам в авиационно-космической отрасли на стендовых испытаниях.

Из этих данных можно сделать вывод о роли, которую играют в эксплуатационных показателях готового изделия операции отделочно-зачистной обработки, поэтому в промышленности применяется достаточно большое количество технологических процессов данного вида (по некоторым оценкам – внедрено свыше сотни процессов [8]), которые можно сгруппировать по механизму воздействия на объект.

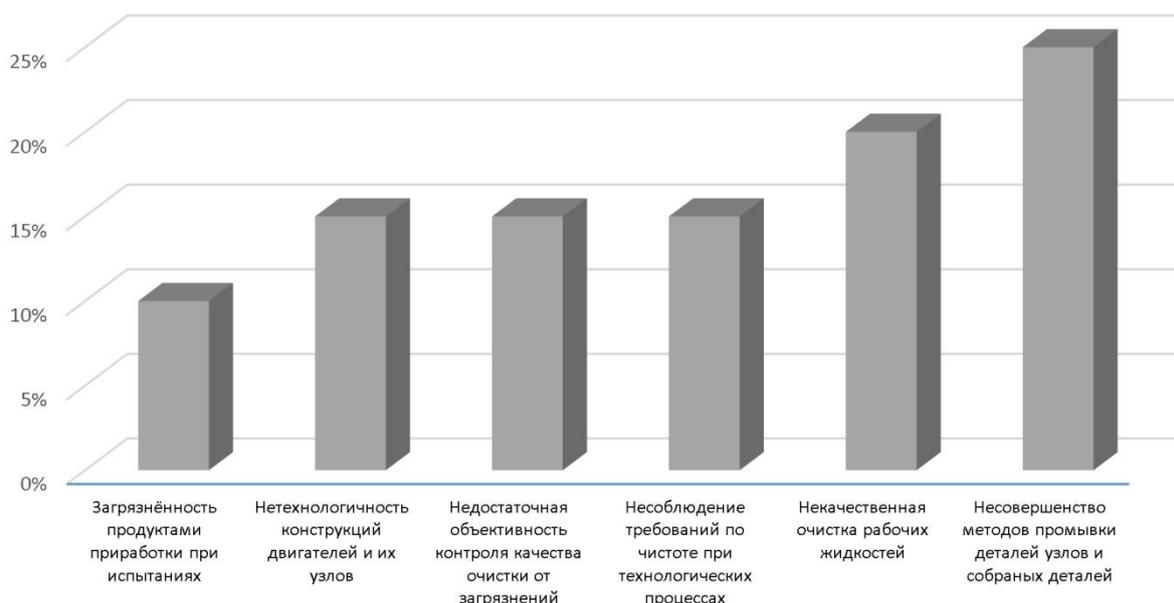


Рисунок 2 – Результаты исследований по отказам в авиационно-космической отрасли на стендовых испытаниях

В первую очередь, это технологии, основанные на механическом воздействии и наиболее распространенные из них – лезвийная и абразивная обработка. Традиционными факторами, ограничивающими их применение, является необходимость силового воздействия на обработанные поверхности, обеспечения поступательного или вращательного движения инструмента или заготовки при формообразовании. Для отделочно-зачистных операций лезвийная обработка имеет, например, такую особенность, как образование вторичных заусенцев или микрочастиц на поверхности детали после скругления кромок. То есть возникает вероятность необходимости введения дополнительных операций, либо внесения изменения в управляющие программы при использовании станков с ЧПУ, что повышает трудозатраты и, как следствие, себестоимость процесса [9]. При использовании абразивного инструмента часто наблюдается эффект шаржирования, при котором в поверхностном слое обработанных заготовок появляются инородные включения, что впоследствии может привести к тому же эффекту, что и при попадании металлических заусенцев в каналы и трубопроводы.

Еще одной группой отделочно-зачистных технологий являются химические методы обработки, при которых, как следует из названия, удаление металла происходит за счет воздействия агрессивных жидкостных или газовых сред. Ограничивающими факторами в данном случае можно считать экологические требования, необходимость разработки механизма локализации воздействий, который должен быть оправдан во избежание недопустимого снижения качества материалов конечных изделий [5].

К методам, основанным на физическом воздействии, можно отнести сжигание заусенцев электроэрозионной обработкой, удаление электрогидроимпульсным воздействием, применение ультразвуковых колебаний и термоимпульсного сжигания. Ограничения использования вышеперечисленных процессов заключаются в том, что они подходят больше для удаления заусенцев и в гораздо меньшей степени – для скругления кромок. Электроэрозионная обработка приводит к химико-термическим изменениям в поверхностном слое в зоне обработки, что накладывает ограничения аналогичные для химических методов [11]. Остальные методы из данной группы требуют, как минимум, наличия специального оборудования, устанавливаемого на отдельных участках в связи с особенностями его эксплуатации, что приводит к повышению трудозатрат и накладных расходов [6].

Так же активно ведутся исследования в области комбинации вышеперечисленных воздействий, которые позволяют в отдельных случаях снизить их ограничения при сохране-

нии необходимых показателей обработки. Например, в работе [9] дается описание технологии, при которой комбинируется гидроабразивная обработка (механическое воздействие) с электрохимической. Схема данного способа показана на рисунке 3.

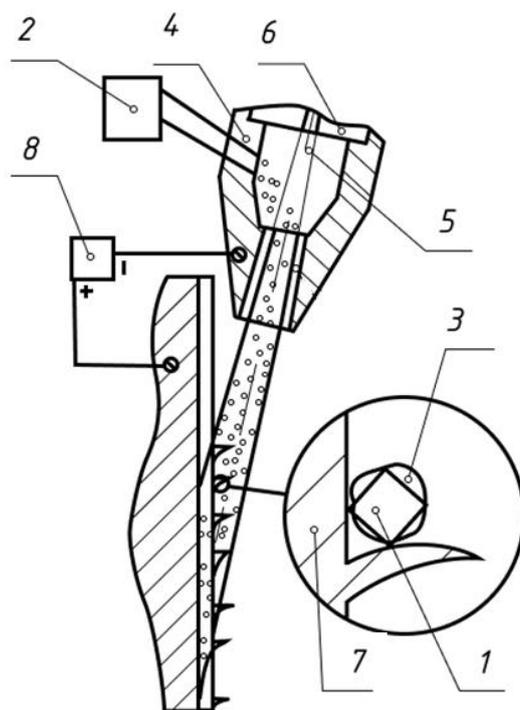


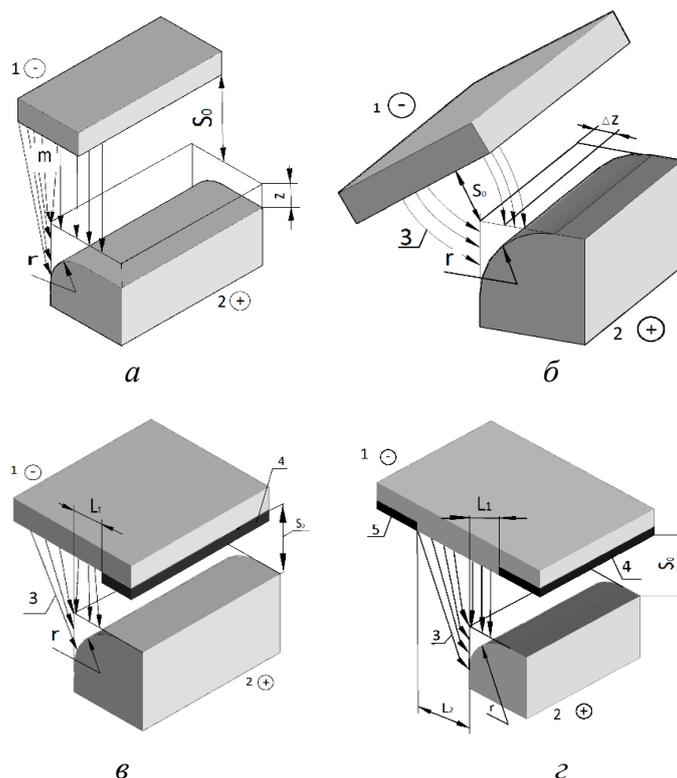
Рисунок 3 – Схема комбинированной отделочно-зачистной обработки

Абразивные гранулы 1 в специальном устройстве 2 покрываются электролитом 3, который замораживается на их поверхности и образует устойчивое поликристаллическое покрытие. Далее, гранулы, получившие токопроводящие свойства, поступают в рабочую камеру 4, откуда, под действием рабочей среды 5, подаваемой из сопла 6, направляются в зону обработки заготовки 7. За счет того, что заготовка подсоединена к аноду источника питания 8, а рабочая камера 4 – к катоду, гранулы становятся носителями электрического заряда и при их сближении с обрабатываемой поверхностью происходит анодное растворение металла заготовки. По известным законам процесса скорость удаления металла обратно пропорциональна расстоянию между электродами, поэтому в первую очередь должны удаляться заусенцы и сглаживаться микро- и макронеровности в зоне обработки. Вторым этапом взаимодействия гранул с заготовкой является механический контакт непосредственно абразивными гранулами, «срезающими» оставшийся после анодного растворения припуск. Согласно данным, приведенным в работах [7, 9, 10], данная технология может повысить производительность отделочно-зачистной обработки до 8 раз по сравнению с традиционной слесарной, имеет хороший потенциал для автоматизации и отказа от ручного труда, позволяет обрабатывать открытые поверхности деталей практически без ограничений их габаритных размеров при широкой номенклатуре геометрии. Вместе с тем, как было сказано ранее, этот комбинированный способ обработки имеет те же ограничения, что и его исходные составляющие – необходимость силового воздействия, продольную подачу инструмента и детали, наличие специального технически сложного и дорогостоящего оборудования для подачи гранул, их замораживания и т.д. Таким образом, рассмотренный случай является характерным примером того, что показатели обработки увеличиваются для конкретной схемы, но соотношение цена-качество может остаться на уровне базовых методов обработки или даже повыситься за счет увеличения цены.

2 Материалы и методы

Для того, чтобы обеспечить необходимый уровень показателей отделочно-зачистной обработки без усложнения технологии и увеличения затрат на оборудование и оснастку, можно рассмотреть возможности управления электрохимическим методом, так как имеется достаточная практическая и теоретическая база знаний по его применению.

В зависимости от конкретной формообразуемой поверхности можно выбрать одну из нескольких схем обработки для обеспечения заданных параметров [15, 17]. На рисунке 4 показаны наиболее типовые варианты позиционирования катода-инструмента относительно заготовки для скругления переходных участков и удаления заусенцев.



1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – электрическое поле;
4, 5 – покрытия из диэлектрических материалов; r – радиус формируемого переходного участка; S_0 – начальный межэлектродный зазор; Δr – припуск на обрабатываемом переходном участке; l_1, l_2 – зазор между кромкой диэлектрика до плоскости обрабатываемой кромки; z – припуск на обработку

Рисунок 4 – Схемы обработки переходных участков при различных конструктивных решениях и размещении электрода-инструмента (ЭИ)

Первая схема (рис. 4, а) является самой простой с точки зрения ее реализации. Электрод-инструмент 1 располагается параллельно одной из плоскостей детали 2, напротив зоны обработки. При этом, как известно, необходимо обеспечить заданный зазор S_0 , так как от его величины будет зависеть скорость растворения металла и плотность электромагнитного поля, условно показанная на рисунке стрелками 3. При оптимальном значении S_0 обработка будет происходить и левее оси m , за счет чего металл будет удаляться и с вертикальной плоскости детали, что приведет к образованию скругления радиусом r . При этом плотность электромагнитного поля на участке детали, параллельного электроду, все же приведет к удалению припуска z , что необходимо предусматривать при проектировании технологии.

В тех случаях, когда удаление припуска z по каким-либо причинам не допускается

(например, при обработке высокоточных поверхностей), целесообразно применять другие варианты взаимного позиционирования инструмента и заготовки. Примером может служить схема, показанная на рисунке 4, б. Ее особенностью является то, что катод располагают перпендикулярно биссектрисе угла при вершине переходного участка в месте обработки. В таком случае припуск Δz формируется нелинейно, так как плотность тока уменьшается при увеличении зазора S_0 , что приводит к формообразованию необходимого скругления на переходном участке.

Еще одним путем управления формообразованием переходных участков является использование диэлектрических покрытий 4 на поверхности катода-инструмента (рис. 4, в). В этом случае необходим расчет или выбор по статистическим данным не только межэлектродного зазора S_0 , но и величины смещения кромки покрытия от сопрягаемых поверхностей переходного участка. Преимуществом метода является необходимая локализация растворения металла и относительная простота средств технологического оснащения. К недостаткам можно отнести то, что зазор между электродами увеличивается на толщину диэлектрика, что приводит к снижению производительности процесса.

Схема, показанная на рисунке 4, г позволяет управлять процессом формообразования острых кромок и удаления заусенцев на уровне, требуемом в серийном производстве. Особенностью проектирования технологического процесса является необходимость расчета величин смещения диэлектрических покрытий l_1 и l_2 от оси обрабатываемой кромки 2 для каждого случая формообразования.

3 Результаты исследований

Как известно, производительность анодного растворения зависит от количества электричества, воздействующего на деталь. Тогда суммарно

$$\frac{1}{j_0} = \frac{1}{j} + \frac{1}{S_0} \int_0^{x_{пред}} \frac{1}{j_i} dx, \quad (1)$$

где j_0 – суммарная плотность тока в точке обработки; j_i – приращение плотности тока в точке переходного участка от воздействия поля на участке катода, удаленного от точки «k» в направлении «x» (рис. 5)

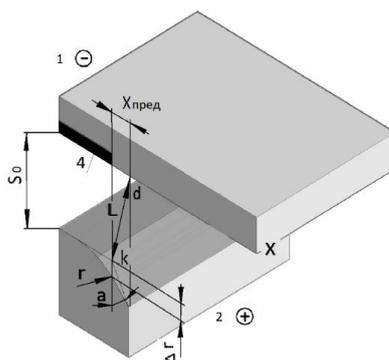


Рисунок 5 – Схема определения предельной зоны обработки: 1; 2 – катод и анод; 4 диэлектрическое покрытие; l – расстояние от точки сопряжения кромок детали до точки с $j_{пред}$

$$j_i = \frac{\chi(u - \Delta u)}{l},$$

j – плотность тока в точке «k»:

$$j = \frac{\chi(u - \Delta u)}{S_0},$$

где χ – коэффициент, характеризующий способность электролита проводить электрический ток при приложении электрического напряжения; u – разность потенциалов на электродах; Δu – потери напряжения при прохождении тока; j_i – приращение плотности тока в точке переходного участка от воздействия поля на участке катода, удаленного от точки « k » в направлении « x ».

Соответственно,

$$j_i = \frac{\chi(u - \Delta u)}{l},$$

$$l = kd = \sqrt{S_0^2 + x^2}.$$

Отсюда

$$j_i = \frac{\chi(u - \Delta u)}{\sqrt{S_0^2 + x^2}},$$

тогда (1) будет иметь вид:

$$\frac{1}{S_0} \int_0^{x_{пред}} \frac{\sqrt{S_0^2 + x^2}}{\chi(u - \Delta u)} dx = \frac{1}{\chi(u - \Delta u)S_0} \int_0^{x_{пред}} \sqrt{S_0^2 + x^2} dx.$$

Интеграл $\int_0^{x_{пред}} \sqrt{S_0^2 + x^2} dx$ можно представить в виде:

$$\int_0^{x_{пред}} \sqrt{S_0^2 + x^2} dx = \frac{1}{2} \left[x_{пред} \sqrt{x_{пред}^2 + S_0^2} + S_0^2 \ln(x_{пред} + \sqrt{x_{пред}^2 + S_0^2}) \right] - S_0^2 \ln S_0. \quad (2)$$

С некоторым упрощением

$$x_{пред} = \frac{x(u - \Delta u)}{j_{пред}}, \quad (3)$$

$j_{пред}$ – предельное значение плотности тока, ниже которого процесс растворения металла прекращается.

Подставив выражения (2) и (3) в уравнение (1), получим:

$$\frac{1}{j_0} = \frac{S_0}{x(u - \Delta u)} + \frac{1}{2S_0} \left[x_{пред} \sqrt{x_{пред}^2 + S_0^2} + S_0^2 \ln(x_{пред} + \sqrt{x_{пред}^2 + S_0^2}) \right] - S_0^2 \ln S_0.$$

Для получения требуемого радиуса необходимо удалить с кромки переходного участка припуск Δr (рис. 5). Управление процессом возможно по времени удаления припуска τ_k .

$$\Delta r = \int_0^{\tau_k} \frac{\alpha}{\gamma} \eta j_0(\tau) d\tau,$$

где α – коэффициент электрохимического эквивалента анода; η – выход по току; γ – плотность материала заготовки.

Как правило, припуск при скруглении кромок составляет десятые доли миллиметра, поэтому упрощенно можно считать, что величина j_0 не зависит от времени:

$$\tau_k = \frac{\Delta r}{\frac{\alpha}{\gamma} \eta j_0} . \quad (4)$$

Из рисунке 5 следует, что Δr составит

$$\Delta r = r(\sqrt{2} + 1) \frac{1}{\cos \alpha} \approx 2.41 \frac{r}{\cos \alpha} .$$

В том случае, когда используется схема обработки, показанная на рисунке 4, *а*, то как уже было сказано выше, необходимо учитывать растворение металла на горизонтальной поверхности, так как его величина δ может выйти за величину заданного на операцию припуска z . По данным работы [6] следует, что для этого должно удовлетворяться условие:

$$\delta = \frac{\alpha}{\gamma} \eta \frac{x(u - \Delta u)}{S_0 + \frac{\delta}{2}} r_k \langle z .$$

Тогда

$$\delta = S_0 + \sqrt{S_0^2 + \frac{\alpha}{\gamma} \eta x(u - \Delta u) \tau_k} . \quad (5)$$

Если суммарная погрешность превышает допустимые значения, то необходимо использовать другие технологические схемы, которые показаны на рисунках 4, *б*, *в*, *г*.

Особенностью применения схемы, приведенной на рисунке 4, *б* является выбор оптимальной величины минимального начального межэлектродного зазора S_0 . По данным работы [5] радиус скругления должен быть в пределах

$$r \leq \Delta r(1 + \sqrt{2}) . \quad (6)$$

Упрощенно, с учетом статистических данных:

$$r \leq 5S_0 . \quad (7)$$

Наличие заусенцев в месте обработки подразумевает увеличение межэлектродного зазора на их высоту h_3 . Тогда начальный зазор S_{03} составит

$$S_{03} = S_0 + h_3 . \quad (8)$$

Для схем обработки, показанных на рисунке 4, *в*, *г* необходимо определить оптимальное расстояние диэлектрических покрытий от ребра детали (размеры l_1, l_2 на рисунке).

При использовании схем рисунка 4, *в*, *г* необходимо ограничить границы расположения диэлектрических покрытий на катоде (l_1, l_2). В данном случае зазор между деталью и инструментом нужно увеличить на толщину диэлектрика h_n

$$\bar{S}_0 = S_0 + h_n . \quad (9)$$

Расчет величин l_1, l_2 дает возможность повысить точность обработки за счет локализации процесса анодного растворения при сохранении необходимого уровня производительности. Исходя из того, что при достижении определенного расстояния между электродами

процесс растворения прекращается, можно определить его значение из уравнения:

$$l_{np} = \frac{x(u - \Delta u)}{j_{npед}} . \quad (10)$$

Тогда

$$l_1 = \sqrt{S_0^2 + l_{np}^2} = \sqrt{S_0^2 + \left(\frac{x(u - \Delta u)}{j_{npед}}\right)^2} . \quad (11)$$

Аналогично выражению (11) можно рассчитать l_2 для схемы, изображенной на рисунке 4, *з*.

$$l_2 = \sqrt{S_0 + \left(\frac{x(u - \Delta u)}{j_{npед}}\right)^2} . \quad (13)$$

4 Обсуждение и заключение

Для обеспечения качества продукции в современных условиях можно воспользоваться технологическими методами, основанными на наукоемких способах электро-физико-химической обработки. Базовое воздействие в виде электрохимической обработки дает достаточно широкие возможности в качестве альтернативы традиционным методам отделочно-зачистной обработки. Рассматриваемая технология позволяет значительно снизить негативные факторы, связанные с концентраторами напряжений и заусенцами, остающимися от предыдущих операций механической обработки. Схемы реализации комбинированных методов, использующих электрохимическое воздействие в качестве базового, сравнительно просты в реализации и могут позволить избежать дополнительных затрат времени и материальных ресурсов на их реализацию.

Список литературы

- 1 Комбинированные методы обработки / В. П. Смоленцев, А. И. Болдырев, А. В. Кузовкин, Г. П. Смоленцев, А. И. Часовских. Воронеж : ВГТУ, 1996. – 168 с.
- 2 Необходимость использования отделочно-зачистных технологий в машиностроении / Лосев А. В., Лосева О. А., Дмитриевская Ю. С. // Металлообработка. 2009. № 1 (49). – С. 2-9.
- 3 Смоленцев, В. П. Влияние электрохимической размерной обработки на физико-механические характеристики металлов // Электрохимическая обработка металлов. Сб. науч. тр. Кишинев : "Штиинца", 1972.
- 4 Сулима, А. М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов / А. М. Сулима, М. И. Евстигнеев. М. : Машиностроение, 1974.
- 5 Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. В 2 т. / Под ред. В. П. Смоленцева. М : Высшая школа, 1983.
- 6 Смоленцев, Е. В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М. Машиностроение. 2005. – 511 с.
- 7 Состояние и перспективы развития комбинированных методов обработки / Смоленцев В. П., Смоленцев Е. В. // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. 2017. № 2 (41). – С. 5-9.
- 8 Справочник технолога (справочное издание) / под. ред. Сулова А. Г. // М. : Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
- 9 Механизм формирования геометрии переходных участков при комбинированной

обработке / Кириллов О. Н., Смоленцев В. П., Котуков В. И. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 3. – С. 71-76.

10 Скрыгин, О. В. Интенсификация массовыноса при комбинированных методах обработки материалов / О. В. Скрыгин, В. П. Смоленцев, А. В. Щеднов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – Т.15. – № 8. – С. 369-374.

11 Куц, В. В. Исследование процесса получения отверстий полым электродом на модернизированном электроэрозионном станке ЧПУ / В. В. Куц, М. С. Разумов, Д. А. Зубков, А. С. Бышкин, А. А. Неструев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 3. – С. 395-402.

12 Science-based technologies creation based on combined processing methods for fabrication aerospace filters / A. Yu. Ryazantsev, A. A. Shirokzhukhova, V. G. Gritsyuk // Materials Today : Proceedings, 19 (2019), 2065-2067. DOI : 10.1016/j.matpr.2019.07.075.

13 Innovative Methods For Obtaining Artificial Roughness On The Surfaces Of Heat-Loaded Parts Of The Liquid Rocket Engines Combustion Chamber / A. Yu. Ryazantsev, A. A. Shirokzhukhova, Yuhnevich S. S. // AIP Conference Proceedings 2318, 030004 (2021). <https://doi.org/10.1063/5.0035987>.

14 Goud, M, Sharma, A P, Jawalkar, CS. A review on material removal mechanism in electrochemical discharge machining (ECDM) and possibilities to enhance the material removal rate. *Precis Eng* 2016; 45 : 1-17.

15 Методика расчета инструмента с непрофилированной рабочей частью / Рязанцев А. Ю., Кириллов О. Н. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 5. – С. 4-7.

16 Yang, C K, Wu, K L, Hung, J C, et al. Enhancement of ECDM efficiency and accuracy by spherical tool electrode. *Int J Mach Tool Manu* 2011; 51 : 528-535.

17 Усов, С. В. Оценка эффективности при внедрении высоких наукоемких технологий / С. В. Усов, Д. С. Свириденко., А. А. Болдырев, С. В. Ковалев, А. В. Мандрыкин. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. – Т. 8. – № 7.1. – С. 87-91.

18 Yang, C K, Cheng, C P, Mai, C C, et al. Effect of surface roughness of tool electrode materials in ECDM performance. *Int J Mach Tool Manu* 2010; 50 : 1088-1096.

19 Han, M S, Min, B K, Lee, S J. Improvement of surface integrity of electro-chemical discharge machining process using powder-mixed electrolyte. *J Mater Process Tech* 2007 ; 191 : 224-227.

20 T. A. El-Taweel, S. A. Gouda Performance analysis of wire electrochemical turning process – RSM approach *Int J Adv Manuf Technol*, 53 (2011), – pp. 181-190.

21 Wire electrochemical machining with axial electrolyte flushing for titanium alloy Ningsong Qu, Xiaolong Fang, Wei Li, Yongbin Zeng, Di Zhu *Chinese Journal of Aeronautics*. Volume 26, Issue 1, February 2013, Pages 224-229.

References

1 *Combined processing methods* / V. P. Smolentsev, A. I. Boldyrev, A. V. Kuzovkin, G. P. Smolentsev, A. I. Chasovskikh. Voronezh : VSTU, 1996. 168 p.

2 *The need to use finishing and stripping technologies in mechanical engineering* / Losev A. V., Loseva O. A., Dmitrevskaya Yu. S. // *Metalloobrabotka*. 2009. №. 1 (49). pp. 2-9.

3 Smolentsev V. P. *The influence of electrochemical dimensional processing on the physical and mechanical characteristics of metals* // *Electrochemical processing of metals*. Collection of scientific articles Chisinau: "Stinza", 1972.

4 Sulima A. M. *Surface layer quality and fatigue strength of parts made of heat-resistant and titanium alloys* / A. M. Sulima, M. I. Evstigneev. M. : Mashinostroenie, 1974.

5 *Electrophysical and electrochemical methods of materials processing*. In 2 vols. / Edited by V. P. Smolentsev. Moscow : Higher School, 1983.

6 Smolentsev E. V. *Design of electrical and combined processing methods*. M. Mechanical engineering. 2005. 511 p.

7 *State and prospects of development of combined processing methods* / Smolentsev V. P., Smolentsev E. V. // Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P. A. Solovyov. 2017. №. 2 (41). pp. 5-9.

8 Technologist's Handbook (reference edition) / ed. Suslov A. G. // M. : Innovative mechanical engineering, 2019. 800 p.

9 *The mechanism of formation of the geometry of transition sections during combined processing* / Kirillov O. N., Smolentsev V. P., Kotukov V. I. // Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2016. Vol. 12. №. 3. pp. 71-76.

10 Strygin O. V. *Intensification of mass transfer in combined methods of processing materials* / O. V. Skrygin, V. P. Smolentsev, A. V. Shchednov // Hardening technologies and coatings – 2019. – Vol. 15. – №. 8. – pp. 369-374.

11 Kutz V. V. *Investigation of the process of obtaining holes with a hollow electrode on a modernized electroerosion CNC machine* / V. V. Kutz, M. S. Razumov, D. A. Zubkov, A. S. Byshkin, A. A. Nestruev // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2020. №. 3. pp. 395-402.

12 *Science-based technologies creation based on combined processing methods for fabrication aerospace filters* / A. Yu. Ryazantsev, A. A. Shirokzhukhova, V. G. Gritsyuk // Materials Today : Proceedings, 19 (2019), 2065-2067. DOI : [10.1016/j.matpr.2019.07.075](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.075).

13 *Innovative Methods For Obtainig Artificial Roughness On The Surfaces Of Heat-Loaded Parts Of The Liquid Rocket Engines Combustion Chamber* / A. Yu. Ryazantsev, A. A. Shirokzhukhova, Yukhnevich S. S. // AIP Conference Proceedings 2318, 030004 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0035987>.

14 Goud, M, Sharma, AP, Jawalkar, CS. *A review on material removal mechanism in electrochemical discharge machining (ECDM) and possibilities to enhance the material removal rate*. Precs Eng 2016; 45: 1-17.

15 *Methodology for calculating a tool with a profiled working part* / Ryazantsev A. Yu., Kirillov O. N. // Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2015. Vol. 11. №. 5. pp. 4-7.

16 Yang, CK, Wu, KL, Hung, JC, et al. *Enhancement of ECDM efficiency and accuracy by spherical tool electrode*. Int J Mach Tool Manu 2011; 51 : 528-535.

17 Usov S. V. *Evaluation of efficiency in the introduction of high science-intensive technologies* / S. V. Usov, D. S. Sviridenko., A. A. Boldyrev, S. V. Kovalev, A. V. Mandrykin. // Bulletin of the Voronezh State Technical University. 2012. – Vol. 8. – №. 7.1. – pp. 87-91.

18 Yang, CK, Cheng, CP, Mai, CC, et al. *Effect of surface roughness of tool electrode materials in ECDM performance*. Int J Mach Tool Manu 2010; 50 : 1088-1096.

19 Han, MS, Min, BK, Lee, SJ. *Improvement of surface integrity of electro-chemical discharge machining process using powder-mixed electrolyte*. J Mater Process Tech 2007 ; 191 : 224-227.

20 T. A. El-Taweel, S. A. *Gouda Performance analysis of wire electrochemical turning process – RSM approach* Int J Adv Manuf Technol, 53 (2011), pp. 181-190.

21 *Wire electrochemical machining with axial electrolyte flushing for titanium alloy* Ningsong Qu, Xiaolong Fang, Wei Li, Yongbin Zeng, Di Zhu Chinese Journal of Aeronautics. Volume 26, Issue 1, February 2013, Pages 224-229.