

DOI: [10.34220/2311-8873-2023-7-9](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-7-9)



УДК 621.9.047; 621.92

UDC 621.9.047; 621.92

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

БЕЗАБРАЗИВНАЯ ЧИСТОВАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ МАШИН КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

NON-ABRASIVE FINISHING OF MACHINE PARTS BY COMBINED METHODS

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

✉¹ **Smolentsev Evgeniy Vladislavovich**, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

Бабенков Никита Николаевич, магистр кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: babenkoff.nikita@yandex.ru

Babenkov Nikita Nikolaevich, Master of the Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University, Voronezh, e-mail: babenkoff.nikita@yandex.ru

Грицюк Василий Григорьевич, заведующий кафедрой технологии машиностроения, к.т.н., Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: vgtukaftm@ya.ru

Gritsyuk Vasily Grigorievich, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, Candidate of Technical Sciences, Voronezh State Technical University, Voronezh, e-mail: vgtukaftm@ya.ru

Ковалев Сергей Викторович, директор АО "КБХА", к.т.н., г. Воронеж, e-mail: vgtukaftm@ya.ru

Kovalev Sergey Viktorovich, Director of KBHA JSC, Candidate of Technical Sciences, Voronezh, e-mail: vgtukaftm@ya.ru

Аннотация. На данный момент традиционные методы обработки глубоко изучены и в полной мере внедрены во все отрасли машиностроения. Многие специалисты считают, что в дальнейшем не стоит ожидать их масштабного развития и новых открытий в этой сфере, а если и появятся какие-либо, то они будут недостаточно конкурентоспособны. Новым глобальным методом развития технологических процессов считается изучение и повсеместное внедрение в создание новых технологических процессов с внедрением комбинированных методов обработки. В них пытаются сочетать механические, химические, тепловые и тому подобные явления. Их комбинированное использование может дать новый рывок развития проектирования последовательности металлообработки.

Annotation. At the moment, traditional processing methods are deeply studied and fully implemented in all branches of mechanical engineering. Many experts believe that in the future we should not expect their large-scale development and new discoveries in this area, and if any appear, they will not be competitive enough. A new global method for the development of technological processes is considered to be the study and widespread introduction into the creation of new technological processes with the introduction of combined processing methods. They try to combine mechanical, chemical, thermal and similar phenomena. Their combined use can give a new breakthrough in the development of metalworking sequence design.

Ключевые слова: БЕЗАБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА, ЭВОЛЬВЕНТА, ЗУБЧАТОЕ КОЛЕСО, ЗУБЧАТАЯ ПЕРЕДАЧА.

Keywords: ABRASIVE-FREE TREATMENT, INVOLUTE, GEAR WHEEL, GEAR TRANSMISSION.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В настоящее время лишь малая часть комбинированных методов с наложением электромагнитных полей внедрена в машиностроение [1, 2]. Помимо прочего, данные методы позволяют создавать намного более сложные и прогрессивные конструкции, которые до этого не позволяло создать ограничение в способах обработки. Поэтому проектирование и внедрение этих методов – это актуальная проблема для современного машиностроения. А решение этой проблемы станет базой для увеличения технологического потенциала и перехода на новый уровень развития производства и выпуска современной техники [3, 4, 5].

Исследования, проведенные как на территории нашей страны, так и за рубежом в направлении обработки с помощью наложения электрического поля создали основу для создания новых, более эффективных и технологичных методов обработки материалов. Это способствует созданию более современной и конкурентноспособной техники. Благодаря исследованиям становится возможным получение сложнопрофильных деталей с анодным растворением материала ниже границы потерь напряжения [6, 7].

Проблема регулирования межэлектродного зазора более неактуальна благодаря комбинированию процессов с наложением низковольтного напряжения и как следствие появилась возможность создания новых, более эффективных, средств технологического оснащения. К тому же это позволило устранить погрешности, связанные с нестабильностью протекания процессов на финальных этапах обработки и достигнуть шестого качества точности. Направлением данного исследования является проектирование технологии доводки поверхностей зубчатых колес с помощью комбинированных методов обработки и, соответственно, разработка оснастки для такой операции. Для выполнения этого следует обозначить решаемые задачи.

Во-первых, следует обосновать рациональность применения данного метода. Во-вторых - провести разработку и расчет режимов данного метода. В-третьих, разработать механизмы управления данным процессом, так как предполагается использовать метод дискретного съема припуска на обработку.

Работа описывает в себе современное обоснование запатентованного способа электрохимической размерной обработки (ЭХРО), который несет в себе описание совмещения при всех вариантах восстановления профиля контактных поверхностей зубчатой передачи технологических и конструкторских баз. Он использует механизм работы самого процесса. Это позволяет получить ранее недостижимую точность при ремонте зубьев.

Что касается практической применимости, она заключается в значительном улучшении технологичности ремонта различных зубчатых передач и в применении нового способа управления процессом. В совокупности это даст возможность уменьшить припуск на данную операцию и осуществлять процесс в рабочем положении зубчатой передачи.

2 Материалы и методы

На данный момент традиционные методы обработки глубоко изучены и в полной мере внедрены во все отрасли машиностроения. Многие специалисты считают, что в дальнейшем не стоит ожидать их масштабного развития и новых открытий в этой сфере, а если и появятся какие-либо, то они будут недостаточно конкурентоспособны. Новым глобальным методом развития технологических процессов считается изучение и повсеместное внедрение в создание новых технологических процессов с внедрением комбинированных методов обработки

[8]. В них пытаются сочетать механические, химические, тепловые и тому подобные явления. Их комбинированное использование может дать новый рывок развития проектирования последовательности металлообработки. В данный момент лишь малая часть этих методов внедрена в машиностроение. Кроме того, данные методы позволяют создавать намного более сложные и прогрессивные конструкции, которые до этого не позволяло создать ограничение в способах обработки. Поэтому проектирование и внедрение этих методов – это актуальная проблема для современного машиностроения. А решение этой проблемы станет базой для увеличения технологического потенциала и перехода на новый уровень развития производства и выпуска современной техники.

Исследования, проведенные как на территории нашей страны, так и за рубежом в направлении обработки с помощью наложения электрического поля создали основу для создания новых, более эффективных и технологичных методов обработки материалов. Это способствует созданию более современной и конкурентноспособной техники. Благодаря исследованиям [1-3] становится возможным получение сложнопрофильных деталей с анодным растворением материала ниже границы потерь напряжения.

Проблема регулирования межэлектродного зазора более неактуальна благодаря комбинированию процессов с наложением низковольтного напряжения и как следствие появилась возможность создания новых, более эффективных, средств технологического оснащения. К тому же это позволило устранить погрешности, связанные с нестабильностью протекания процессов на финальных этапах обработки и достигнуть шестого качества точности [9-11].

3 Результаты исследований

В модели предполагается, что за счет калибровки толщины и напряжения оксидной пленки есть возможность управлять скоростью съема материала и изменять сопротивление межэлектродного зазора. При этом можно не бояться возникновения коротких замыканий.

Процесс комбинированной доводки может быть использован как для новых зубчатых передач, так и для изношенных.

1. Новые зубчатые передачи.

В данной ситуации можно рассмотреть несколько случаев. В частности, используется несколько комбинаций воздействия электрического тока на обрабатываемую поверхность.

Если заготовки зубчатых колес были обработаны модульными фрезами, то припуск на обработку будет незначительным, а основополагающим фактором будет требование соблюдения нормы плавности соприкосновения поверхностей зубьев.

Припуск на ЭХО – $Z_{\text{эхо}}$ учитывается в случае близости к допуску $[\delta]$ на профиль колеса. При условии соблюдения неравенства (1) эту составляющую допускается не учитывать при расчете.

$$[\delta] \geq 2Z_{\text{эхо}} \quad (1)$$

Если же условие неравенства не выполняется и допуск оказывается меньше, то припуск на ЭХО принимается как $Z_{\text{эхо}} \geq 2R_{z0}$, где параметр R_{z0} является высотой неровностей, полученной на предшествующей обработке.

Частный случай получения заготовки при помощи экструзирования, прессования и металлоштамповки. В таком случае после проведения черновой обработки требуется получить чистую поверхность профиля зубьев, обеспечивающую плавность их контакта без возможных ограничений по кинематической точности. После проведения доводки требуется регулирование бокового зазора, которое можно выполнить с помощью регулирования межцентрового расстояния. Чистовая же обработка ведется на переменных режимах электрохимическим методом. После чего проводятся испытания на плавность контакта зубчатых колес.

2. Изношенные зубчатые колеса.

При возникновении кинематической погрешности, выходящей за пределы допуска $[\delta]$ потребуется снятие определенного количества припуска. Это может произойти в нескольких случаях, которые можно объединить в группы.

а) Колеса не поддаются доводке. Это можно с полной уверенностью утверждать, когда одно или сразу оба зубчатых колеса находятся на нижней границе поля допуска или же вообще выходят из него в отрицательную сторону.

б) Колеса поддаются доводочным операциям если:

- некондицией является одно колесо и на нем остается припуск на обработку.
- некондицией являются оба колеса, но припуск на обработку у них меняется.

Так же следует заметить, что если в паре колес обработка производится только с одним, то она будет происходить без переключения полярности.

Основным требованием в данном процессе является соблюдение норм плавности и контакта зубьев, что обеспечивается при выполнении условий, таких как обработка заготовок модульными фрезами, а также соблюдение незначительного припуска на чистовой обработке.

Комбинированная доводка зубчатых колес может иметь свои вариации, из чего следует что для описание данного процесса стоит разграничить две функциональные категории [12-14]:

1. В случае обработки только одного колеса, инструментом для которого станет либо неизношенное, второе колесо, либо эталонное колесо. В течении всего процесса доводки полярность на электродах не будет менять имеющиеся показатели.

2. В случае обработки обоих колес, каждое из них попеременно являются инструментом, а затем заготовкой. Рассматривая данную категорию, следует заметить, что полярность в течении обработки будет периодически меняться. Причем диаметр, степень износа и предельный припуск на обработку для каждого из колес будет иметь индивидуальный период длительности.

Ведомое колесо в установке регулируется тормозом, контактные усилия от которого, в свою очередь, управляют интенсивностью съема. Её регулировка ведется за счет постоянства поступления среднего тока, подаваемого на электроды.

Так же для этой операции требуется рассмотреть возможный случай, при котором для проведения процесса доводки необходимо снижать степень шероховатости сопрягаемых поверхностей. Для этого процесса рассмотрим следующие этапы.

На рисунке 1 можно видеть начало доводки. На нем происходит взаимное движение обрабатываемых поверхностей.

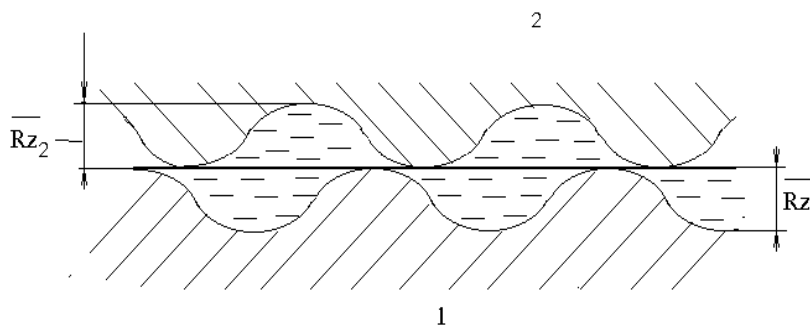


Рисунок 1 – Начало доводочной операции

Ток на данном этапе еще не подаётся, исходная высота неровностей Rz_1 и Rz_2 . Зазор между поверхностями будет равен толщине оксидной пленки.

Второй этап (рис. 2) характеризуется подачей тока на электроды, при сохраняющемся относительном движении.

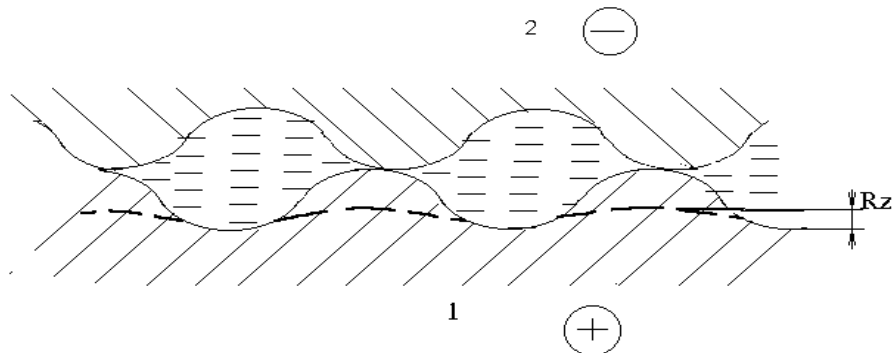


Рисунок 2 – Протекание процесса доводочной операции

Как раз на этом этапе начинается процесс анодного растворения. Сущность процесса заключается в том, что при взаимном вращении зубчатых колес происходит механическая депассивация оксидной пленки. В данном конкретном случае, она рвется в местах контакта поверхностей. Стоит отметить, что процесс анодного растворения идет гораздо активнее в тех местах, где выступы микронеровностей находятся ближе всего друг к другу. На расстоянии равном толщине оксидной пленки. Так же на процесс можно повлиять механическим методом. При ускорении или затормаживании будет происходить изменение давления на зуб, что так же приведет к изменению межэлектродного зазора.

На наибольшие же выступы будет оказываться самое большое давление. Таким образом и наибольший съем материала будет происходить именно в этих местах, которые, проще говоря, можно определить, как места с наибольшей шероховатостью.

Высота неровностей поверхности 1, которая подключена к положительно заряженному плюсу, уменьшается за счет анодного растворения до величины Rz_1 . Перекачивание электролита необходимо для очистки от микростружки из межэлектродного промежутка. Но этот процесс происходит из-за движения зубчатых колес, следовательно, скорость промывки будет равна скорости их движения [15].

Во время протекания третьего этапа, показанном на рисунке 3 полярности поверхностей меняются, следовательно, процесс обработки переходит на противоположную поверхность.

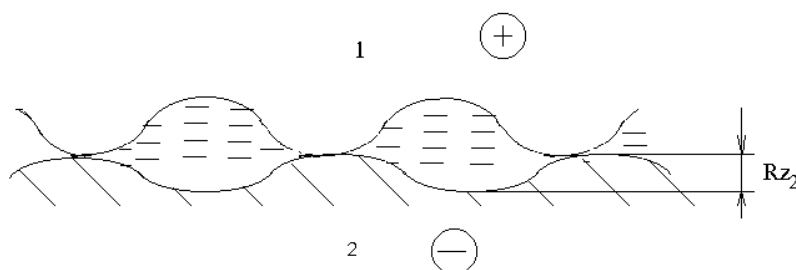


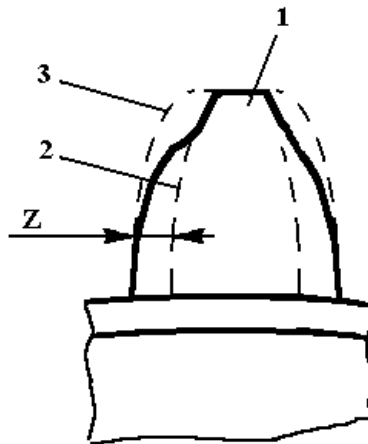
Рисунок 3 – Окончание доводочной операции

Отметим, что этот этап необходим только тогда, когда требуется обработка пары зубчатых колес, которые находятся в зацеплении. Этот этап, по своей сути, проходит как первый, а после него шероховатость второго колеса будет равна Rz_2 .

Таким образом данная операция повторяется поочередно, пока не будет достигнут нужный результат.

3. Восстановление изношенного зуба.

Данная операция отличается от прежних. Во время работы наибольший износ будут иметь контактные поверхности зубьев. Точнее в начальной и конечной точках.



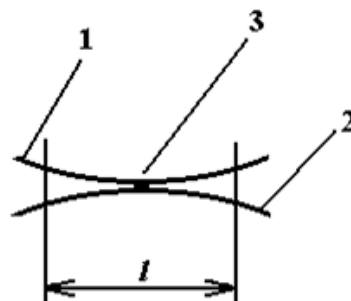
1 – зуб; 2 – минимально допустимые границы профиля; 3 – первоначальный профиль

Рисунок 4 – Профиль выработанного зуба

Процесс будет заключаться в удалении припуска z . При этом мы имеем возможность восстановить профиль эвольвенты без потери точности зубчатого колеса. Если величина припуска не позволит нам остаться в пределах допуска, то следует изменить точность зубчатой передачи.

Последовательность обработки будет аналогична обработке для снижения шероховатости. Наиболее интенсивно съём металла будет проходить там, где давление и межэлектродное расстояние будут наибольшими. Иначе говоря, съём металла будет происходить там, где износ меньше [16].

Когда требуется обработка одного колеса, по аналогии с основным первым этапом, смена полярности не потребуется. В обратном случае она потребуется. В каждый момент времени обработки снятие металла будет не по всей площади, а только ее участок (рис. 5).



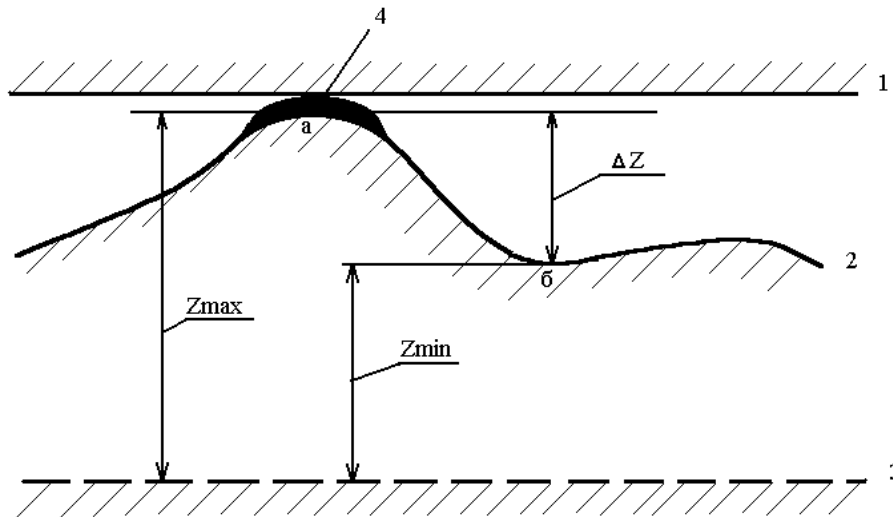
1;2 – зубья; 3 – точка контакта; l – длина зоны контакта.

Рисунок 5 – Локальная доводка профиля

С наибольшей интенсивностью процесс будет протекать в точке 3. При этом по мере увеличения межэлектродного зазора потеря напряжения будет расти, следовательно, съём металла

уменьшаться. Отношение общего времени обработки к длине данного участка будет равно отношению длины пути, которое будет проходить зуб при вращении колес к длине контакта [17].

Для управления процессом доводки зубчатых колес была предложена следующая схема (рис. 6).



1 – исходный профиль; 2 – контур сечения обрабатываемого зуба; 3 – минимальное предельное значение толщины изношенного зуба; 4 – слой, формируемый окисной пленкой; Z_{max} – максимальное значение толщины слоя, которое можно удалить во время доводки; Z_{min} – минимальный припуск на обработку обрабатываемой поверхности; ΔZ – неравномерность припуска

Рисунок 6 – Расчетная схема процесса при доводке профиля зуба

Граничными условиями для построения модели можно считать следующие [18, 19]: обрабатываемый профиль не имеет резких перепадов размеров; минимальный припуск не пересекает границы 3 на рисунке 6, анод и катод не имеют непосредственного контакта, между ними имеется слой, формируемый оксидной пленкой («а» на рисунке 6),

Тогда

$$\delta_n \geq \Delta z \geq 0, \quad (2)$$

где δ_n – допуск на толщину зуба согласно заданному значению на чертеже.

Для выполнения условия (2) необходимо рассчитать прогнозируемую величину Δz .

Если предположить, что в точке «а» имеется вязкий слой, образующийся за счет сжатия рабочей среды в процессе взаимодействия инструмента и заготовки, то вязкость можно рассчитать по известной формуле [19]:

$$\delta = 4,64 \sqrt{\frac{vL}{W_0}} \sqrt[3]{\frac{v}{D_k}}, \quad (3)$$

где v – кинематическая вязкость среды; L – длина зоны обработки; W_0 – средняя скорость электролита; D_k – коэффициент диффузии.

Для дисперсных систем, к которым по [19] могут относиться вещества, образующиеся в ходе ЭХРО, коэффициент диффузии рассчитывается по зависимости:

$$D_k = \frac{RT}{N\sigma\tau\mu},$$

где R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; N – число Авогадро; σ – давление в точке контакта; r – радиус диффундирующих частиц; μ – динамическая вязкость среды.

Значение газовой постоянной « R » при ЭХРО изменяется в широких пределах. Поэтому в [20] для расчета D_k используется формула

$$D_k = 0,96 \cdot 10^{-3} [1 + 0,0289 (T - 273)].$$

Значение ν на участке «а» (рис. 6) имеет величину, соответствующую по [3] параметру технического машинного масла при $T = 315$ К.

Протяженность фронта обработки может быть приведена к дуге перекрытия зубчатого зацепления, которая по [1]:

$$L = \varepsilon \cdot p_i, \quad (4)$$

где ε – коэффициент перекрытия, по [1] « ε » можно принять равным 1,2-1,5; p_i – шаг между зубьями $p_i = \frac{\pi m}{z}$, где m – модуль.

Средняя скорость прокатки электролита в данном случае определяется с учетом того, что в зоне контакта зубьев рабочая среда с определенной вязкостью перемещается с проскальзыванием.

Тогда для L при частоте вращения n

$$W_0 = KL \cdot n = K\varepsilon p_i n, \quad (5)$$

где K – коэффициент проскальзывания, который показывает отставание жидкости от участка соприкосновения колес.

Тогда из (5) можно выразить частоту вращения зубчатых колес

$$n = \frac{W_0 \cdot z_{зуб}}{K \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot D}, \quad (6)$$

где $z_{зуб}$ – число зубьев обрабатываемой детали;

D – диаметр обрабатываемой детали по начальной окружности.

По рис. 6 минимальный зазор в точке «а» составляет S_1 , а максимальный («б», рис. 6)

$$S_2 = S_1 + \Delta z(\tau),$$

где $\Delta z(\tau)$ – изменение неравномерности припуска за время протекания процесса τ .

Если не учитывать перекрытие эвольвенты в зацеплении, линейное растворение металла (V) при чистовой обработке по [4], в точках «а» и «б» соответственно составит

$$V_6 = \frac{\alpha}{\gamma} \eta \frac{\chi(U - \Delta U)}{\Delta z(\tau)}, \quad (7)$$

$$V_a = \frac{\alpha}{\gamma} \eta \frac{\chi(U - \Delta U)}{\delta}, \quad (8)$$

где α - электрохимический эквивалент сплава;

χ - удельная проводимость среды;

γ - удельный вес сплава;

η - выход по току;

U - напряжение на электродах;

ΔU – потери напряжения.

Учитывая интервал времени τ_6 , в течении которого должен быть удален заданный слой металла z_{\min} с обрабатываемой детали, при соблюдении условия $\Delta z \leq \delta_n$, из (7), (8)

$$\Delta z(\tau) = [V_a(\tau) - V_6(\tau)]\tau_6.$$

Тогда

$$\tau_6 = \frac{4,64\gamma\Delta z(\tau)^2 \sqrt{\frac{vL}{W_0}}}{\sqrt[3]{\frac{v}{D}} \cdot \alpha\eta\chi(U - \Delta U) \left[\Delta z(\tau) - 4,64 \sqrt{\frac{vL}{W_0}} \sqrt[3]{\frac{v}{D}} \right]} \quad (9)$$

С учетом известных законов, по которым происходит ЭХРО, обработка в точках «а» и «б» происходит за равные отрезки времени ($\tau_a = \tau_6 = \tau$), хотя скорость анодного растворения в точке «а» будет существенно выше, т.к. величина « δ » измеряется микронами и при выполнении условия массовыноса [4] повышенный съем материала в точке «а» будет снижать неравномерность припуска.

Для осуществления неравенства (2) в конце обработки необходимо достичь

$$\Delta z \leq \delta_n.$$

Тогда при условии (9)

$$\Delta z = z_{\min} \Delta z(\tau) \left(\frac{\sqrt[3]{\frac{v}{D}}}{4,64 \sqrt{\frac{vL}{W_0}}} - \frac{1}{\Delta z(\tau)} \right) \leq \delta_n, \quad (10)$$

где L, W_0 – находят по (4), (5).

Решение уравнения (9) позволяет управлять процессом доводки через значение времени обработки t , при котором выполняется условие (10).

4 Обсуждение и заключение

Приведенные выше расчетные зависимости позволяют управлять процессом низковольтной доводки сопрягаемых эвольвентных колес с достаточной точностью. На рис. 7 показаны расчетные результаты вычислений по предложенной модели. Показано, что профиль зуба выравнивается при стремлении соотношения максимального и минимального припусков к единице за достаточно небольшое время (менее 10 секунд) при величине межэлектродного зазора, близкой к толщине оксидной пленки (точка «а» на рис. б) и величинах напряжений, близких к величине потерь в зоне контакта электродов.

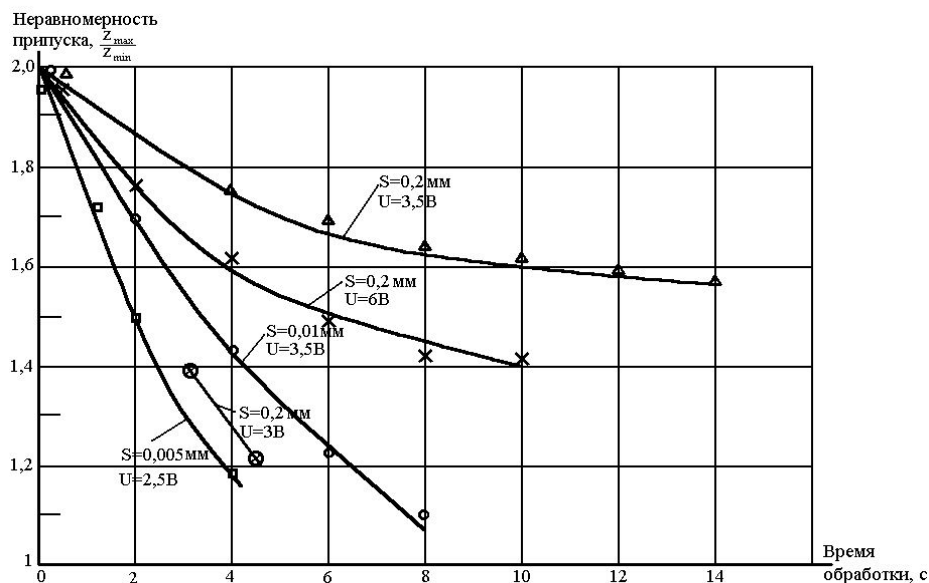


Рисунок 7 – Выравнивание профиля зуба при различных величинах межэлектродного промежутка и рабочего напряжения

Исходя из проведенных расчетов, можно говорить, что по предлагаемому способу появляется возможность снизить трудоемкость доводки зубчатых колес не менее чем на порядок за счет одновременной обработки всего профиля эвольвенты с дискретным удалением припуска на изношенных участках.

Список литературы

- 1 Справочник технолога (справочное издание) / под. ред. Сулова А.Г. // М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
- 2 Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М. Машиностроение. 2005. 511 с.
- 3 Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. В 2 т. / Под ред. В.П. Смоленцева. М: Высшая школа, 1983.
- 4 Комбинированные методы обработки / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, А.В. Кузовкин, Г.П. Смоленцев, А.И. Часовских. Воронеж: ВГТУ, 1996. 168 с.
- 5 Смоленцев В.П. Влияние электрохимической размерной обработки на физико-механические характеристики металлов // Электрохимическая обработка металлов. Сб. науч. тр. Кишинев: "Штиинца", 1972.

- 6 Сулима А.М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов / А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев. М.: Машиностроение, 1974.
- 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 Абляз Т.Р. Изучение изменения свойств электродов в зависимости от режимов проволочно-вырезной электроэрозионной обработки // Вестник ПГТУ. Машиностроение, материаловедение. - 2011. - Т. 13. - № 1. - С. 87-93.
- 9 Абляз Т.Р., Шлыков Е.С., Кремлев С.С. Применение электродов-инструментов с покрытием для электроэрозионной обработки стали 38Х2Н2МА // СТИН. - 2017. - № 5. - С. 20-21
- 10 Эмпирическое моделирование межэлектродного при электроэрозионной обработке стали 38Х2Н2МА / Т.Н. Абляз, Е.С. Шлыков, Д.А. Борисов, А.А. Шумков, И.Ю. Летягин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. - 2017. - Т. 19, № 2. - С. 67-79.
- 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, Yukhnevich S.S. // AIP Conference Proceedings 2318, 030004 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0035987>
- 14 Micro electrical discharge machining single discharge temperature field simulation / Z.L. Peng, Y.N. Li, D. Fang, Y.Y. Zhang. - USA: JCPRC5, 2013. - P. 859-864.
- 15 Jiajing Tang, Xiaodong Yang. A Thermo-hydraulic Modeling for the Formation Process of the Discharge Crater in EDM // 18th CIRP Conference ISEM XVIII. - 2016. - № 42. - P. 685-690.
- 16 Obara H. Detection of Discharging Position on WEDM // Proceedings of 10th ISEM, 1992 - p. 404-409.
- 17 Umang Maradia. Meso-Micro EDM: diss. Dr. sc. ETH Zurich No. 22024. - Zurich, 2014. - 246 p.
- 18 Matthias Hackert-Oschatzchen. Single Discharge Simulations of Needle Pulses for Electrothermal Ablation. - Rotterdam: COMSOL Conference, 2013. - P. 1-5.
- 19 Weingartner E., Kuster F., Wegener K. Modeling and simulation of electrical discharge machining // 1st CIRP Global Web Conference. - 2012. - № 2. - P. 74-78.
- 20 Chander Parkash Khatter Analysis of surface integrity in electrical discharge machining (EDM) process for tungsten carbide material: dis. Ph. D. - Patiala, India, 2010.

References

- 1 Technologist's Handbook (reference edition) / ed. Suslova A.G. // M.: Innovative mechanical engineering, 2019. 800 p.
- 2 Smolentsev E.V. Design of electrical and combined processing methods M.: Mechanical engineering, 2005 - 511 p.
- 3 Electrophysical and electrochemical methods of materials processing: In 2 volumes/ Edited by V.P. Smolentsev. M.: Higher School, 1983.
- 4 Combined processing methods / V.P. Smolentsev, A.I. Boldyrev, A.V. Kuzovkin, G.P. Smolentsev, A.I. Chasovskikh. Voronezh: VSTU, 1996. 168 p.
- 5 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.

6 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.

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. No. 2 (41). pp. 5-9.

8 Ablyaz T.R. Study of changes in the properties of electrodes depending on the modes of wire-cut electroerosion treatment // Bulletin of PSTU. Mechanical engineering, materials science. - 2011. - Vol. 13. -No. 1. - pp. 87-93.

9 Ablyaz T.P., Shlykov E.C., Kremlev S.S. Application of coated tool electrodes for electroerosion treatment of 38X2N2MA steel // STIN. - 2017. - No. 5. - pp. 20 -21

10 Empirical modeling of interelectrode flow during electroerosion treatment of 38X2N2MA steel / T.N., Balyas, E.S. Shlykov, D.A. Borisov, A.A. Shumkov, I.Yu. // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science. - 2017. - Vol. 19, No. 2. - pp. 67-79.

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. No. 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

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 Micro electrical discharge machining single discharge temperature field simulation / Z.L. Peng, Y.N. Li, D. Fang, Y.Y. Zhang. - USA: JCPRC5, 2013. - P. 859-864.

15 Jiajing Tang, Xiaodong Yang. A Thermo-hydraulic Modeling for the Formation Process of the Discharge Crater in EDM // 18th CIRP Conference ISEM XVIII. - 2016. - № 42. - P. 685-690.

16 Obara H. Detection of Discharging Position on WEDM // Proceedings of 10th ISEM, 1992 - p. 404-409.

17 Umang Maradia. Meso-Micro EDM: diss. Dr. sc. ETH Zurich No. 22024. - Zurich, 2014. - 246 p.

18 Matthias Hackert-Oschatzchen. Single Discharge Simulations of Needle Pulses for Electrothermal Ablation. - Rotterdam: COMSOL Conference, 2013. - P. 1-5.

19 Weingartner E., Kuster F., Wegener K. Modeling and simulation of electrical discharge machining // 1st CIRP Global Web Conference. - 2012. - № 2. - P. 74-78.

20 Chander Parkash Khatter Analysis of surface integrity in electrical discharge machining (EDM) process for tungsten carbide material: dis. Ph. D. - Patiala, India, 2010.

© Смоленцев Е.В., Бабенков Н.Н., Грицюк В.Г., Ковалёв С.В., 2023