

**Выбор оптимальных параметров операций
алмазно-искрового шлифования**
Новиков Ф.В., докт. техн. наук, Гуцаленко Ю.Г.

В работе приведена методика выбора оптимальных параметров операций алмазно-искрового шлифования изделий из труднообрабатываемых материалов

В роботі наведено методику вибору оптимальних параметрів операцій алмазно-іскрового шліфування виробів із важкооброблюваних матеріалів

На ряде операций шлифования изделий из труднообрабатываемых материалов используются алмазные круги на металлических связках, характеризующиеся чрезвычайно высокой износостойкостью и обеспечивающие повышение производительности и качества обработки при съеме относительно больших припусков. Для поддержания их высокой режущей способности разработаны эффективные методы электрохимической и электроэрозионной правки, комбинированные процессы шлифования, основанные на введении в зону резания дополнительной электрической энергии (например, процесс алмазно-искрового шлифования) [1, 2]. Вместе с тем, их потенциальные возможности в полной мере не изучены и не используются на практике. Это, с одной стороны, сдерживает широкое внедрение алмазных кругов на металлических связках в производство, а с другой стороны, требует проведения комплекса исследований по выбору, обоснованию и реализации новых технологических возможностей алмазного шлифования на основе математического моделирования и оптимизации параметров операций шлифования. Полученные решения будут иметь большое значение при проектировании технологических операций круглого наружного (внутреннего) и плоского алмазного шлифования изделий из твердых сплавов и высокопрочных пластичных материалов (износостойкие наплавки, высокопрочные стали и т.д.), шлифование которых абразивными и алмазными кругами затруднено в силу низких показателей производительности и качества обработки.

Цель работы - повышение эффективности операций алмазно-искрового шлифования на основе их математического моделирования и теоретического анализа технологических возможностей.

Для решения задач выбора оптимальных параметров операций алмазно-искрового шлифования важно рассмотреть два условия (необходимое и достаточное) его осуществления. Необходимое условие заключается в обеспечении равномерного во времени износа алмазного круга (стабилизации параметров его режущего рельефа) путем введения в зону резания дополнительной энергии в форме электрических разрядов с целью достижения высокой режущей способности круга (вплоть до его полного износа).

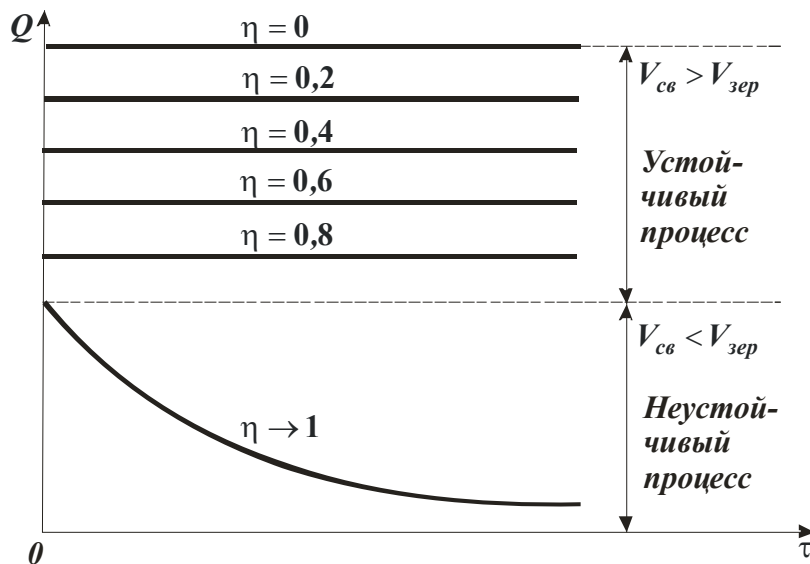


Рис. 1. Характер изменения производительности обработки Q с течением времени шлифования τ для различных значений безразмерного коэффициента η .

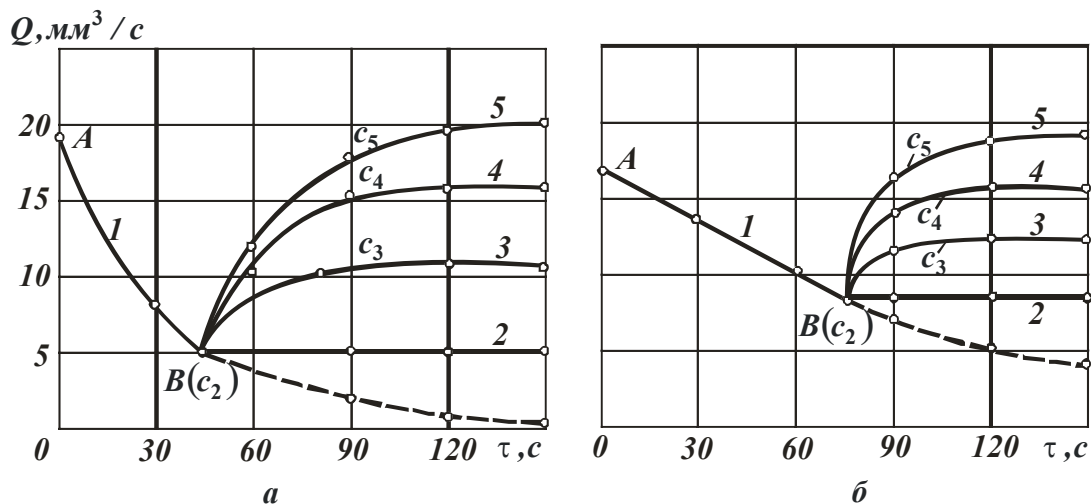


Рис. 2. Влияние продолжительности шлифования и условной плотности тока в цепи управления на производительность обработки твердого сплава КНТ-16 (а) и жаропрочного сплава ЭИ-765 (б):

а - $P_y = 1,8$ МПа ($i_y = 0$; 2 - $i_y = 1,5 \cdot 10^{-4}$ А/мм²; 3 - $i_y = 3 \cdot 10^{-4}$ А/мм²; 4 - $i_y = 4,5 \cdot 10^{-4}$ А/мм²; 5 - $i_y = 6 \cdot 10^{-4}$ А/мм²);

б - $P_y = 0,6$ МПа ($i_y = 0$; 2 - $i_y = 1 \cdot 10^{-4}$ А/мм²; 3 - $i_y = 2 \cdot 10^{-4}$ А/мм²; 4 - $i_y = 3 \cdot 10^{-4}$ А/мм²; 5 - $i_y = 4 \cdot 10^{-4}$ А/мм²).

Достаточное условие заключается в оптимизации процесса шлифования, т.е. в определении оптимальных параметров режущего рельефа алмазного круга и условий шлифования на основе критериев наибольшей производительности или наименьшей технологической себестоимости обработки с учетом требований к качеству обрабатываемых поверхностей.

Изучению указанных условий в научно-технической литературе уделено довольно большое внимание, получены важные решения. Однако, эти решения

получены экспериментальным путем для частных условий обработки, что не позволяет в полной мере раскрыть потенциальные возможности операций алмазно-искрового шлифования и выйти на более высокий уровень технико-экономических показателей обработки.



Рис. 3. Структурная схема выбора оптимальных условий алмазно-искрового шлифования.

Поэтому в настоящей работе поставлены задачи выявления и обоснования новых технологических возможностей операций алмазно-искрового шлифования аналитическим путем.

В результате проведенных теоретических исследований нами впервые получена важная аналитическая зависимость [3]:

$$\frac{V_{з\text{ер}}}{V_{св}} = \eta, \quad (1)$$

увязывающая скорости износа связки $V_{св}$ и зерен $V_{з\text{ер}}$ круга посредством безразмерного коэффициента η - обобщенного параметра процесса, определяющего степень затупления зерен и изменяющегося в пределах $0 \dots 1$ (для острого зерна $\eta \rightarrow 0$, для затупленного зерна $\eta \rightarrow 1$). Из зависимости (1) вытекает условие обеспечения устойчивого во времени процесса шлифования: $V_{св} > V_{з\text{ер}}$. При невыполнении данного условия (т.е. при $V_{св} < V_{з\text{ер}}$) процесс шлифования будет протекать неустойчиво – алмазный круг будет работать в режиме затупления, что не позволит реализовать его потенциальные возможности.

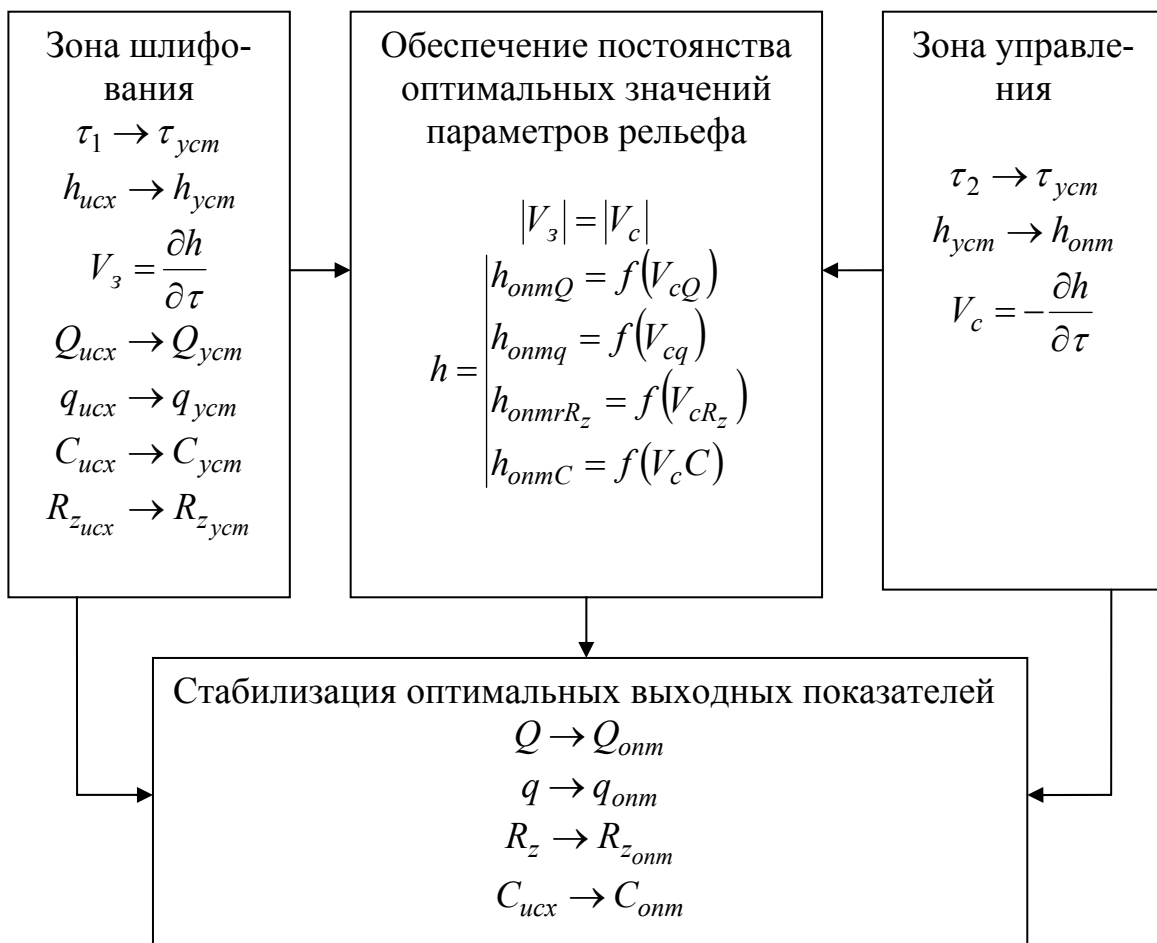


Рис. 4. Структурная схема оптимизации процесса шлифования.

Например, производительность обработки Q при условии $V_{св} < V_{з\text{ер}}$ с течением времени шлифования τ будет непрерывно уменьшаться, а при условии $V_{св} > V_{з\text{ер}}$ - оставаться постоянной, рис. 1. При этом с уменьшением безразмерного коэффициента η в пределах от 1 до 0 производительность обработки Q будет увеличиваться.

Данный теоретический результат хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований, полученными проф. Грабченко А.И. [4] при

шлифовании алмазным кругом на металлической связке труднообрабатываемых материалов с применением непрерывной автономной электрохимической правки, рис. 2. Как следует из приведенного рисунка, при шлифовании без применения электрохимической правки алмазного круга производительность Q с течением времени обработки τ непрерывно уменьшается. Применение электрохимической правки позволяет стабилизировать во времени производительность обработки Q . При этом с увеличением условной плотности тока i_y в цепи управления производительность обработки Q увеличивается. Из этого вытекает, что кривая 1 (рис. 2) соответствует условию $V_{св} < V_{зер}$ (определяющему неустойчивый процесс шлифования), а кривые 2, ..., 5 – условию $V_{св} > V_{зер}$ (определяющему устойчивый процесс шлифования). Увеличение условной плотности тока i_y в цепи управления соответствует уменьшению безразмерного коэффициента η в пределах от 1 до 0.

Из зависимости (1) следует, что между скоростью износа связки и безразмерным коэффициентом η существует обратно пропорциональная связь. Увеличение скорости износа связки предполагает уменьшение безразмерного коэффициента $\eta \rightarrow 0$, т.е. повышение остроты зерен и соответственно режущей способности алмазного круга.

Из этого можно сделать вывод, что эффект алмазно-искрового шлифования состоит прежде всего в возможности увеличения скорости износа связки $V_{св}$ и соответственно уменьшения безразмерного коэффициента $\eta \rightarrow 0$ за счет принудительного удаления с рабочей поверхности алмазного круга затупившихся зерен путем электроэрозионного (ударно-термического) разрушения металлической связки. По сути, полученное теоретическое решение является математическим выражением необходимого условия осуществления процесса алмазно-искрового шлифования, который заключается в стабилизации во времени безразмерного коэффициента η .

Зная безразмерный коэффициент η (для заданной скорости износа металлической связки, обусловленной электроэрозионным воздействием на рабочую поверхность круга), по аналитическим зависимостям можно определить параметры режущего рельефа круга и основные технологические показатели шлифования: производительность, технологическую себестоимость, шероховатость обработки и другие.

На основе аналитических зависимостей, теоретически обосновано достаточное условие осуществления процесса алмазно-искрового шлифования. Его суть состоит в определении оптимальных значений безразмерного коэффициента η по критериям наибольшей производительности обработки, минимума удельного расхода алмаза и технологической себестоимости обработки, заданной шероховатости обрабатываемой поверхности, силы и мощности резания при шлифовании и т.д. В обобщенном виде структурная схема условий осуществления алмазно-искрового шлифования показана на рис. 3.

На рис. 4 приведена структурная схема оптимизации процесса шлифова-

ния, предложенная проф. Грабченко А.И. [5]. Суть ее сводится к тому, что оптимизация процесса шлифования достигается стабилизацией (за счет применения электрохимической правки алмазного круга на металлической связке) значения высоты выступания контактирующих зерен над связкой h , оптимизированного по соответствующему выходному показателю шлифования Q, q, C, R_z (соответственно производительность, удельный расход алмаза, себестоимость обработки и шероховатость обработанной поверхности). Индексы “исх”, “уст”, “опт” (рис. 4) относятся к исходным, установившимся и оптимизированным параметрам – высоте выступания зерен h , производительности обработки Q , удельному расходу алмаза q , себестоимости C , шероховатости R_z ; V_z, V_c - соответственно интенсивности износа зерна и съема связки; τ - длительность шлифования.

Как видно, существует отличие указанной структурной схемы (рис. 4) от предложенной нами в работе структурной схемы оптимизации параметров шлифования (рис. 3). Оно состоит в том, что в первом случае в основу оптимизации процесса шлифования положена высота выступания контактирующих зерен над связкой h . В нашем же случае в основу оптимизации процесса шлифования положена величина линейного износа зерен x до момента их выпадения из связки круга, определяемая безразмерным коэффициентом η . Высота выступания контактирующих зерен над связкой h является производной величиной, зависящей от параметров x, η и соответственно скорости износа связки круга $V_{св}$.

На схеме (рис. 4) показано, что для обеспечения устойчивого во времени процесса шлифования интенсивности износа зерна и съема связки должны быть равны. Однако, исходя из полученной нами аналитической зависимости (1), данное условие выполняется при $\eta \rightarrow 1$, что, как показано выше, отрицает возможность реализации устойчивого процесса шлифования. Вместе с тем, существует “исключение из правил” – это шлифование синтетических сверхтвердых материалов, когда практически отсутствует внедрение режущих зерен алмазного круга в обрабатываемый материал. В этом случае $x \rightarrow H$, т.е. $\eta = \frac{x}{H} \rightarrow 1$, и поэтому появляется возможность реализации устойчивого процесса шлифования. Следовательно, условие $V_{св} = V_{зep}$, обеспечивающее устойчивый процесс шлифования, может быть осуществлено лишь при обработке синтетических сверхтвердых материалов. В остальных случаях, т.е. при шлифовании менее твердых материалов (твердых сплавов, высокопрочных пластичных материалов и т.д.) скорость износа связки $V_{св}$ должна быть больше скорости износа зерен $V_{зep}$ круга.

Необходимо отметить, что оптимизация процесса шлифования в соответствии со структурной схемой, показанной на рис. 4, выполняется на основе экспериментальных данных. В нашем же случае оптимизацию параметров шлифования можно производить на основе аналитических зависимостей основных показателей обработки, несомненно, используя и дополнительно экспериментальные данные.

Рассмотрим последовательность выбора оптимальных механических и электрических параметров режима алмазно-искрового шлифования на основе полученных нами теоретических решений. В качестве целевой функции примем технологическую себестоимость обработки. Поставим задачу выбора условий шлифования, обеспечивающих минимум технологической себестоимости обработки $C \rightarrow \min$. Для этого воспользуемся аналитической зависимостью для определения технологической себестоимости обработки C [6]:

$$C = a_1 \cdot q + \frac{a_2}{Q \cdot \rho_m} \quad (2)$$

где a_1 - стоимость алмаза в круге, коп/мг; a_2 - зарплата рабочего, коп/с; q - удельный расход алмаза, мг/г; Q - производительность обработки, м³/с; ρ_m - плотность обрабатываемого материала, г/м³.

Производительность обработки $Q = B \cdot V_{\text{дет}} \cdot t$ и удельный расход алмаза q описываются следующими зависимостями [7]:

$$Q = \frac{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot B \cdot b^3 \cdot (1 - \eta)}{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3} \cdot \sqrt{\frac{t}{\rho}} \quad (3)$$

$$q = \frac{\rho_a}{\rho_m} \cdot \frac{630 \cdot \pi^2 \cdot \bar{X}^3 \cdot D_{\text{кр}} \cdot \alpha \cdot V_{\text{зер}}}{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot b^3} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} \cdot \frac{1}{\eta \cdot (1 - \eta)} \quad (3)$$

где m - объемная концентрация зерен круга; \bar{X} - зернистость круга, м; $V_{\text{кр}}$ - скорость круга, м/с; t - глубина шлифования, м; $D_{\text{кр}}$, B - соответственно диаметр и ширина алмазного круга, м; $\rho = 1/R_{\text{кр}} + 1/R_{\text{дет}}$; $R_{\text{кр}}$, $R_{\text{дет}}$ - соответственно радиусы круга и детали, м; α - коэффициент, учитывающий плотность связки в зависимости от концентрации алмазных зёрен в круге [7]; ρ_a - плотность алмаза, кг/м³; $V_{\text{зер}}$ - скорость износа зерна, м/с; b - максимальная высота выступания зерен над уровнем связки круга, м.

Зависимость (2) с учетом зависимостей (3) и (4) примет вид:

$$C = \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot A_1}{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot b^3} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} \cdot \frac{1}{(1 - \eta)} \cdot \left(\frac{A_1}{\eta} + B_1 \right) \quad (5)$$

где $A_1 = \frac{\rho_a}{\rho_m} \cdot \pi \cdot D_{\text{кр}} \cdot B \cdot \alpha \cdot V_{\text{зер}} \cdot a_1$; $B_1 = \frac{a_2}{\rho_m}$.

Как следует из зависимости (5), безразмерный коэффициент η оказывает на технологическую себестоимость обработки C противоположное влияние, т.е. зависимость $C - \eta$ носит экстремальный характер. Для определения экстремума (минимума) функции C , продифференцируем ее по безразмерному коэффициенту η и полученное выражение приравняем нулю. В результате имеем:

$$\eta^2 + 2 \cdot z \cdot \eta - z = 0, \quad (6)$$

где $z = \frac{A_1}{B_1} = \pi \cdot D_{\text{кр}} \cdot B \cdot \alpha \cdot V_{\text{зер}} \cdot \rho_a \cdot \frac{a_1}{a_2}$.

Пришли к квадратному уравнению относительно неизвестной величины η . Его решение:

$$\eta = -z \pm \sqrt{z^2 + z}. \quad (7)$$

В зависимости (6) необходимо принять знак “+”, т.к. безразмерный коэффициент η - положительная величина. Для упрощения зависимости (7) умножим числитель и знаменатель на сопряженную величину

$$z \pm \sqrt{z^2 + z},$$

тогда

$$\eta = \frac{1}{\left(1 + \sqrt{1 + \frac{1}{z}}\right)}. \quad (8)$$

Как следует из зависимости (8), безразмерный коэффициент η принимает значения: $\eta < 0,5$. Из зависимости (3) вытекает, что экстремум (минимум) удельного расхода алмаза q достигается при $\eta = 0,5$. Следовательно, оптимизация параметров шлифования по критерию минимума технологической себестоимости обработки C позволяет реализовать меньшие значения безразмерного коэффициента η . Согласно зависимости (3), это ведет к увеличению множителя $(1-\eta)$ и соответственно производительности обработки Q приблизительно в 2 раза.

Таким образом показано, что оптимизация параметров шлифования по критерию минимума технологической себестоимости обработки C позволяет более полно использовать потенциальные возможности алмазных кругов по сравнению с оптимизацией параметров шлифования по критерию минимума удельного расхода алмаза q .

Исходя из зависимости (8), уменьшить безразмерный коэффициент η можно за счет уменьшения параметра z , т.е. уменьшения $D_{кр}, B, \alpha, V_{зер}, \rho_a, a_1$ и увеличения a_2 .

Таким образом, установлено оптимальное значение безразмерного коэффициента η . Однако, как известно для эффективного ведения процесса алмазного шлифования наряду с обеспечением минимума технологической себестоимости обработки C (или минимума удельного расхода алмаза q) необходимо выполнить требования по параметрам качества обработки. Поэтому определим оптимальные условия шлифования с учетом ограничения по шероховатости обработки.

Проведем анализ аналитической зависимости для определения параметра шероховатости обработки R_a [8]:

$$R_a = 2 \cdot \sqrt[5]{\frac{(1-\eta)^4 \cdot 4 \cdot \pi^4 \cdot \bar{X}^6 \cdot R_{дет}^2 \cdot S_{np}^2 \cdot \rho}{(1+\eta)^2 \cdot \text{tg}^2 \gamma \cdot m^2 \cdot V_{кр}^2 \cdot B^2}}, \quad (9)$$

где S_{np} - скорость продольной подачи, м/с; 2γ - угол при вершине режущего зерна.

Зависимость (9) содержит безразмерный коэффициент η , параметры режима шлифования, характеристики круга и детали. Принимая требуемое значение R_a и оптимальное значение безразмерного коэффициента η , по зависимости (9) можно определить скорость продольной подачи S_{np} (при заданных значениях зернистости \bar{X} и объемной концентрации зерен круга m , скорости круга $V_{кр}$, радиусов круга $R_{кр}$ и детали $R_{дет}$, ширины круга B).

В зависимость (9) глубина шлифования t явно не входит. Глубина шлифования t влияет на параметр шероховатости обработки R_a через изменение безразмерного коэффициента η . Поэтому обеспечить заданное значение параметра шероховатости обработки R_a можно за счет реализации оптимального значения безразмерного коэффициента η . Это выполняется путем регулирования интенсивности электроэрозионного воздействия на рабочую поверхность алмазного круга на металлической связке в процессе алмазно-искрового шлифования.

К сожалению, аналитически установить связь между безразмерным коэффициентом η и интенсивностью подводимой в зону резания электрической энергии весьма сложно. Данная связь может быть установлена лишь экспериментальным путем. Для этого (при заданных механических параметрах режимов шлифования) определяется экспериментальная зависимость шероховатости обработки R_a от электрического параметра, например, величины силы тока I . По установленной зависимости, для заданного значения R_a , определяется оптимальное значение силы тока I . Полученное таким образом значение I реализует оптимальное значение безразмерного коэффициента η , т.е. минимум технологической себестоимости обработки C .

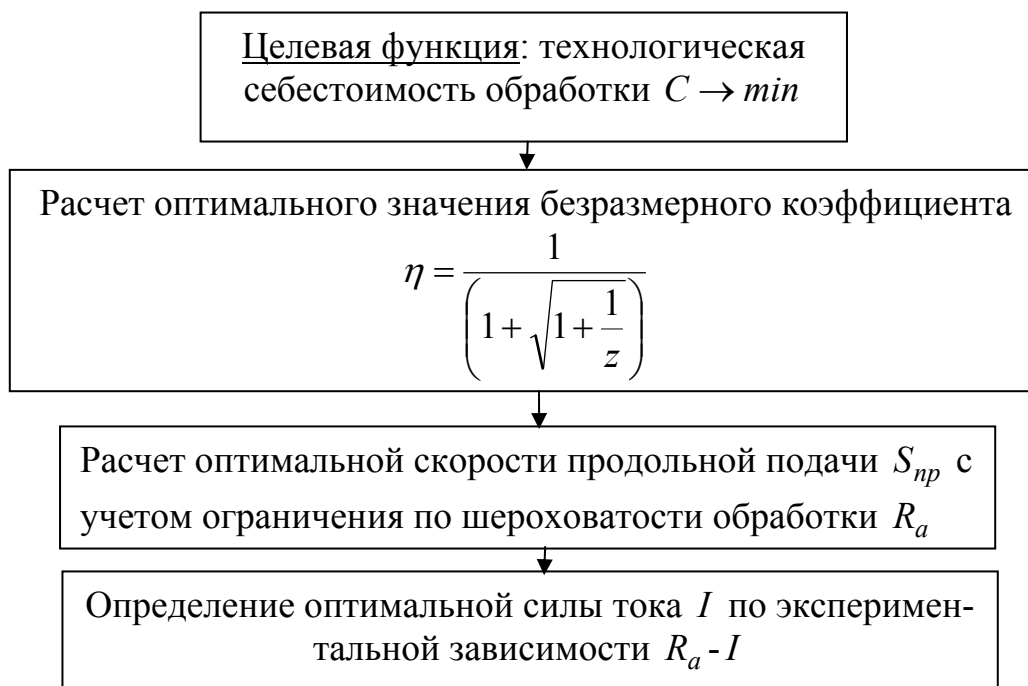


Рис. 5. Структурная схема методики выбора оптимальных параметров алмазно-искрового шлифования.

Глубину шлифования t при этом необходимо устанавливать максимально возможной, что позволит обеспечить наибольшую производительность обработки Q . Следовательно, методика выбора оптимальных условий алмазно-искрового шлифования является по своей сути расчетно-экспериментальной, рис. 5. Таким образом в работе приведена новая методика выбора оптимальных условий алмазно-искрового шлифования, позволяющая в максимальной степени использовать высокие потенциальные возможности этого прогрессивного метода обработки.

Список литературы:

1. Беззубенко Н.К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов: Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01 / Харьк. гос. техн. ун-т. - Харьков, 1995. – 56 с.
2. Захаренко И.П. Алмазные инструменты и процессы обработки. – К.: Техніка, 1980. – 212 с.
3. Новиков Ф.В., Гуцаленко Ю.Г. Разработка аналитической модели устойчивого во времени процесса алмазного шлифования // Вісник НТУ "ХП". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ "ХП". – 2005. - № 12. – С. 51-63.
4. Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. – Харьков: Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1985. –184 с.
5. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні: Навч. посібник / За редакцією А.І. Грабченко – Харків, ХДПУ, 1999. – 436 с.
6. Израйлович М.Я. Оптимизация процессов механической обработки алмазным и твердосплавным инструментом. – М.: ВНИИТЭМР, 1985. – 44 с.
7. Кашук В.А., Мелехин А.Д., Бармин Б.П. Справочник заточника. – М.: Машиностроение, 1982. – 232 с.
8. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: Автореф. дис....докт. техн. наук: 05.03.01 / Одес. гос. политехн. ун-т. – Одесса, 1995. – 36 с.
9. Новиков Ф.В., Гуцаленко Ю.Г. Формирование рабочей поверхности алмазного круга в процессе шлифования // Вісник НТУ "ХП" Збірник наукових праць. Тем. вип.: Технології в машинобудуванні. –2002. - № 9, т. 10. – С. 115-120.