

## **ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЦИКЛА КРУГЛОГО НАРУЖНОГО ПРОДОЛЬНОГО АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ**

**Дитиненко С.А.**

*(Харьковский государственный экономический университет)*

*В работе на основе теоретических и экспериментальных исследований проведена параметрическая оптимизация цикла круглого наружного продольного алмазного шлифования специальных твердосплавных инструментов по критерию максимальной производительности с учетом ограничения по точности обработки*

При изготовлении ответственных агрегатов и деталей авиационной техники широко используются специальные режущие твердосплавные инструменты. В отличие от обычных ГОСТовских инструментов, как правило, они имеют более сложную геометрическую форму рабочей части, а требования к точности и шероховатости обработки рабочих поверхностей значительно выше. Высокие требования к качеству обработки инструментов значительно усложняют технологию их изготовления, приводят к снижению производительности механической обработки. В особой мере это относится к технологической операции круглого наружного продольного алмазного шлифования, где в силу недостаточно жесткого крепления обрабатываемого инструмента на станке при съеме больших припусков возникают значительные упругие перемещения в технологической системе. Основным путем их уменьшения является применение различных циклов шлифования [1,2,3]. Однако, вопросы оптимизации параметров цикла изучены недостаточно и требуют дальнейших исследований. Цель работы – проведение параметрической оптимизации цикла круглого наружного продольного алмазного шлифования специальных твердосплавных инструментов.

В связи с этим проведем анализ путей повышения производительности обработки на технологической операции круглого наружного продольного многопроходного шлифования цилиндрической детали диаметром  $D_{\text{дет}}$  и длиной  $l_{\text{дет}}$  с учетом ограничения по точности обработки (точности размера) обусловленной упругими деформациями элементов технологической системы.

В общем виде фактическая производительность обработки  $Q_{\text{ф}}$  определяется зависимостью:

$$Q_{\phi} = \frac{v}{\tau}, \quad (1)$$

где  $v = \pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot (\Pi - \delta)$  - объем материала, который снимается за время  $\tau$  с цилиндрической детали при шлифовании, м<sup>3</sup>;  $\Pi$  - величина снимаемого припуска, м;  $\delta$  - величина упругого перемещения, определяющая точность размера обрабатываемой детали, м;  $\tau = n \cdot \tau_0$  - время шлифования, с;  $n = \Pi / t$  - количество продольных ходов круга;  $t$  - глубина шлифования, м;  $\tau_0 = l_{дет} / S_{прод}$  - время одного продольного хода круга, с;  $S_{прод}$  - скорость продольной подачи, м/с.

После несложных преобразований зависимость (1) опишется

$$Q_a = Q_{ном} \cdot \left(1 - \frac{\delta}{\Pi}\right), \quad (2)$$

где  $Q_{ном} = \pi \cdot D_{дет} \cdot t \cdot S_{прод}$  - номинальная производительность обработки, м<sup>3</sup>/с.

Из зависимости (2) следует, что фактическая производительность обработки  $Q_{\phi}$  всегда меньше номинальной производительности обработки  $Q_{ном}$  в связи с возникновением в технологической системе упругого перемещения  $\delta$ . Основным путем увеличения  $Q_{\phi}$  необходимо рассматривать уменьшение величины упругого перемещения  $\delta$  за счет изменения условий обработки. Величина  $\delta$  определяет точность размера обработки. Она задается на чертеже обрабатываемой детали и по величине значительно меньше снимаемого припуска  $\Pi$ . С учетом этого в зависимости (2) вторым слагаемым можно пренебречь, в результате чего приходим к зависимости  $Q_{\phi} \approx Q_{ном}$ . В данном случае номинальная производительность обработки связана определенным образом с величиной  $\delta$ . Для установления этой связи воспользуемся известным теоретическим решением, приведенным в работах Новикова Ф.В. [3, 4]:

$$\delta = \frac{P_y}{c} = \frac{P_z}{c \cdot K_{ш}} = \frac{\sigma \cdot S_{мгн}}{c \cdot K_{ш}} = \frac{\sigma \cdot Q_{\phi}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \approx \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}, \quad (3)$$

где  $P_y$ ,  $P_z$  - соответственно радиальная и тангенциальная составляющие силы резания при шлифовании, Н;  $c$  - приведенная жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м;  $K_{ш} = P_z / P_y$  - коэффициент шлифования;  $\sigma$  - условное напряжение резания при шлифовании, Н/м<sup>2</sup>;  $V_{кр}$  - скорость круга, м/с.

Из зависимости (3) следует, что величина  $\sigma$  и номинальная производительность обработки  $Q_{ном}$  связаны линейной зависимостью. Следовательно, уменьшение величины  $\sigma$  требует пропорционального уменьшения

$Q_{ном}$  и соответственно  $Q_{ф}$ , что не эффективно, в особенности при съеме больших припусков.

Что же надо сделать, чтобы повысить производительность обработки, обеспечивая при этом требуемую точность обработки? Вполне очевидным является решение, связанное с применением цикла круглого наружного продольного шлифования, включающего два этапа. На первом этапе производится черновое шлифование с максимально возможной производительностью обработки  $Q_{ном}$ . На втором этапе – чистовое шлифование с меньшей производительностью обработки  $Q_{ном}$ , определяемой в соответствии с зависимостью (3) и обеспечивающей заданную точность обработки  $\sigma$ . Величина снимаемого припуска на втором этапе равна величине упругого перемещения, возникающего на первом этапе шлифования.

Существуют циклы шлифования, включающие несколько этапов. На практике широкое применение получил цикл шлифования, включающий этап чернового шлифования и этап выхаживания, т.е. этап шлифования с отключенной поперечной подачей станка. На данном этапе процесс съема припуска происходит за счет упругих перемещений в технологической системе, которые возникли на этапе чернового шлифования.

Средняя фактическая производительность рассмотренного цикла круглого наружного продольного шлифования определяется зависимостью

$$Q_{cp} = \frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \Pi}{(\tau_1 + \tau_2)} = \frac{Q_{ном}}{(1 + \alpha)}, \quad (4)$$

где  $\tau_1, \tau_2$  - соответственно продолжительность первого и второго этапов цикла шлифования, с;  $\Pi$  - величина снимаемого припуска, м;  $Q_{ном}$  - номинальная производительность обработки на этапе чернового шлифования, м<sup>3</sup>/с;  $\alpha = \tau_2 / \tau_1$ .

Из зависимости (4) следует, что средняя фактическая производительность цикла шлифования  $Q_{cp}$  всегда меньше номинальной производительности обработки на этапе чернового шлифования  $Q_{ном}$ , рис. 1. Произ-

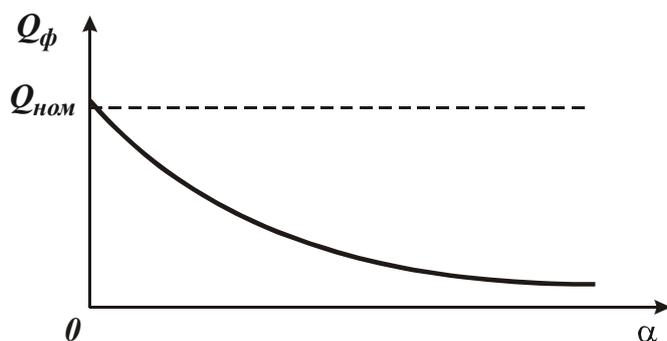


Рис. 1. Зависимость  $Q_{ф}$  от  $\alpha$ .

водительность  $Q_{cp}$  для заданных значений  $D_{дет}$ ,  $l_{дет}$  и  $\Pi$  определяется двумя параметрами:  $\tau_1$  и  $\tau_2$ . Физически они связаны между собой, т.к. время  $\tau_1$  определяет величину упругого перемещения на этапе чернового шлифования, которое равно снимаемому припус-

ку на этапе выхаживания и соответственно определяет время  $\tau_2$ . Для определения  $\tau_2$  получено линейное дифференциальное уравнение с правой частью:

$$\frac{dv}{d\tau} + A \cdot v = B, \quad (5)$$

где  $A = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot F}$ ;  $B = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \Pi_1}{\sigma}$ ;  $v$  - объем снятого материала,  $m^3$ ;  $F = \pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет}$  - площадь обрабатываемой цилиндрической поверхности,  $m^2$ ;  $\Pi_1$  - припуск, удаляемый на этапе чернового шлифования,  $m$ .

Общее решение уравнения с учетом начального условия  $\delta /_{\tau=0} = \Pi_2$ :

$$v = v_{02} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot F} \cdot \tau} \right), \quad (6)$$

$$Q_{\phi} = Q_{\phi 2} \cdot e^{-\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot F} \cdot \tau}, \quad (7)$$

$$\delta = \Pi_2 \cdot e^{-\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot F} \cdot \tau}, \quad (8)$$

где  $Q_{\phi}$  - фактическая производительность этапа выхаживания,  $m^3/c$ ;  $\delta$  - величина упругого перемещения,  $m$ ;  $\Pi_2$  - припуск, удаляемый на этапе выхаживания,  $m$ ;  $v_{02} = \Pi_2 \cdot F$ ;  $Q_{\phi 2} = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \Pi_2}{\sigma}$ .

Из приведенных зависимостей следует, что с течением времени обработки  $\tau$  на этапе выхаживания объем снятого материала  $v$  увеличивается, а фактическая (текущая) производительность обработки  $Q_{\phi}$  и величина упругого перемещения  $\delta$  уменьшаются по экспоненциальному закону, рис. 2.

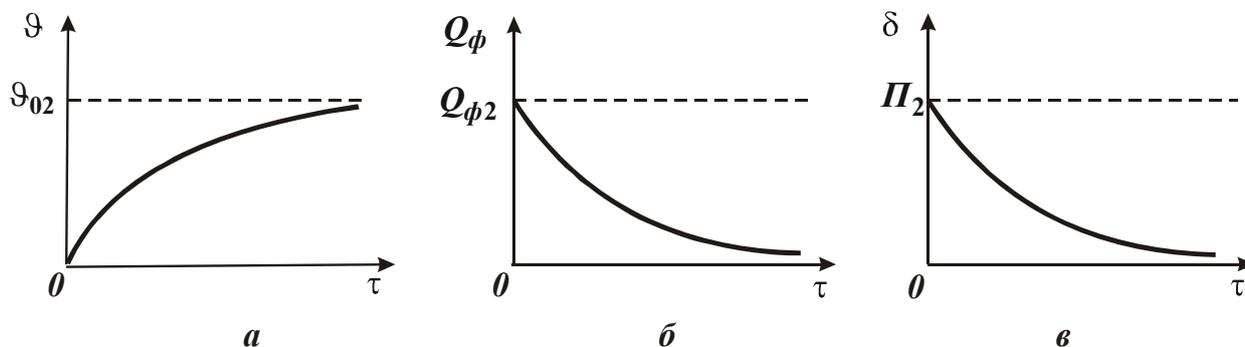


Рис. 2. Изменение параметров  $v$  (а),  $Q_{\phi}$  (б) и  $\delta$  (в) во времени обработки  $\tau$ .

Из зависимости (8) можно определить время  $\tau = \tau_2$ , затрачиваемое на этапе выхаживания для обеспечения требуемой точности обработки  $\delta_o$ :

$$\tau_2 = \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot (\ln \Pi_2 - \ln \delta_o). \quad (9)$$

Как видим, большое влияние на время  $\tau_2$  оказывает величина снимаемого припуска  $\Pi_2$ : с увеличением  $\Pi_2$  время  $\tau_2$  увеличивается. Величина  $\Pi_2$  формируется на этапе чернового шлифования и равна  $\Pi_2 = \Pi - \Pi_1$ , где  $\Pi_1$  - величина припуска, снимаемого на этапе чернового шлифования.

Воспользуемся данной зависимостью для расчета и анализа общего времени цикла шлифования ( $\tau_1 + \tau_2$ ), входящего в зависимость (4). Время  $\tau_1$  представим в виде:  $\tau_1 = n \cdot \tau_0$ , где  $n = \Pi / t$  - количество продольных ходов круга, необходимое для съема припуска величиной  $\Pi$ ;  $t$  - глубина шлифования, м;  $\tau_0 = l_{дет} / S_{прод}$  - время одного продольного хода круга, с;  $l_{дет}$  - длина обрабатываемой цилиндрической детали, м;  $S_{прод}$  - скорость продольной подачи, м/с. Тогда  $\tau_1 = l_{дет} \cdot \Pi / t \cdot S_{прод}$ . Глубину шлифования  $t$  выразим через величину упругого перемещения  $\Pi_2$ , возникающего на этапе чернового шлифования. Для этого воспользуемся зависимостью (3), рассматривая в ней  $\delta = \Pi_2$ ;  $Q_{ном} = B_1 \cdot t \cdot V_{дет}$ , где  $B_1$  - продольная подача, м/об. Тогда

$$\tau_1 = \frac{l_{дет} \cdot \sigma \cdot B_1 \cdot V_{дет} \cdot \Pi}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot S_{прод} \cdot \Pi_2}. \quad (10)$$

Общее время цикла шлифования ( $\tau_1 + \tau_2$ ) с учетом зависимостей (9) и (10) выразится:

$$(\tau_1 + \tau_2) = \frac{l_{дет} \cdot \sigma \cdot B_1 \cdot V_{дет} \cdot \Pi}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot S_{прод} \cdot \Pi_2} + \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot (\ln \Pi_2 - \ln \delta_o). \quad (11)$$

На этапах чернового шлифования и выхаживания соотношение  $\sigma / K_{ш}$ , определяющее режущую способность круга, различно в связи с различными значениями глубины шлифования. Поэтому значения  $\sigma / K_{ш}$ , входящие в первое и второе слагаемое зависимости (11), различны. Обозначим значения  $\sigma / K_{ш}$  на этапах чернового шлифования и выхаживания

соответственно:  $\left(\frac{\sigma}{K_{ш}}\right)_1$  и  $\left(\frac{\sigma}{K_{ш}}\right)_2$ ,  $z = \left(\frac{\sigma}{K_{ш}}\right)_2 / \left(\frac{\sigma}{K_{ш}}\right)_1$  - безразмерный коэффициент ( $z \geq 1$ ). Преобразуем зависимость (11) с учетом сделанных допущений

$$(\tau_1 + \tau_2) = \left(\frac{\sigma}{K_{ш}}\right)_1 \cdot \left[ \frac{l_{дет} \cdot B_1 \cdot V_{дет} \cdot \Pi}{c \cdot V_{кр} \cdot S_{прод} \cdot \Pi_2} + \frac{F}{c \cdot V_{кр}} \cdot z \cdot (\ln \Pi_2 - \ln \delta_o) \right]. \quad (12)$$

Параметр  $\Pi_2$  в первом слагаемом входит в знаменатель, а во втором слагаемом – в числитель, т.е. оказывает противоположное влияние на время  $(\tau_1 + \tau_2)$ . Из этого вытекает, что с увеличением параметра  $\Pi_2$  время  $(\tau_1 + \tau_2)$  будет изменяться по экстремальной зависимости. Проведем исследование функции  $(\tau_1 + \tau_2)$ , описываемой зависимостью (12), на экстремум. Первоначально рассмотрим упрощенный случай  $z=1$ . В результате несложных преобразований установлено, что экстремальное (минимальное) значение параметра  $\Pi_2$  равно величине снимаемого припуска  $\Pi$ .

Из этого вытекает, что в точке экстремума  $\Pi_2 = \Pi$  достигается минимум функции  $(\tau_1 + \tau_2)$ . Следовательно, с точки зрения уменьшения общего времени рассматриваемого цикла шлифования (или увеличения производительности обработки) целесообразно исключить из цикла этап чернового шлифования, т.е. съём всего припуска производить лишь на этапе выхаживания, создавая в технологической системе начальный натяг, равный величине снимаемого припуска  $\Pi$ .

Примем, что  $\Pi_2 = k_2 \cdot \Pi$ , где  $k_2$  – безразмерный коэффициент, изменяющийся в пределах  $0 \dots 1$ . При  $k_2 = 1$ , очевидно, приходим к оптимальному циклу шлифования, обеспечивающему минимум функции  $(\tau_1 + \tau_2)$ . Для анализа преобразуем зависимость (12) с учетом  $F = \pi \cdot D_{\text{дем}} \cdot l_{\text{дем}}$  и  $\delta_o = k_0 \cdot \Pi$  к виду:

$$(\tau_1 + \tau_2) = \frac{\pi \cdot D_{\text{дем}} \cdot l_{\text{дем}}}{c \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \left( \frac{\sigma}{K_{\text{ш}}} \right)_1 \cdot \left[ \frac{1}{k_2} + z \cdot \ln \left( \frac{k_2}{k_0} \right) \right]. \quad (13)$$

В результате преобразований пришли к зависимости с безразмерными величинами (в квадратной скобке), удобной для анализа. Обозначим

$$\Phi = \left[ \frac{1}{k_2} + z \cdot \ln \left( \frac{k_2}{k_0} \right) \right].$$

На рис. 3 показан характер изменения безразмерной функции  $\Phi$ , определяющей функцию  $(\tau_1 + \tau_2)$ , в зависимости от коэффициента  $k_2$ . С увеличением  $z$  ( $z_1 = 1, z_2 = 2, z_3 = 3, z_4 = 4$ ) минимум безразмерной функции  $\Phi$  увеличивается и смещается в область меньших значений коэффициента  $k_2$ . При  $z_1 = 1$  безразмерная функция  $\Phi$  принимает наименьшее значение.

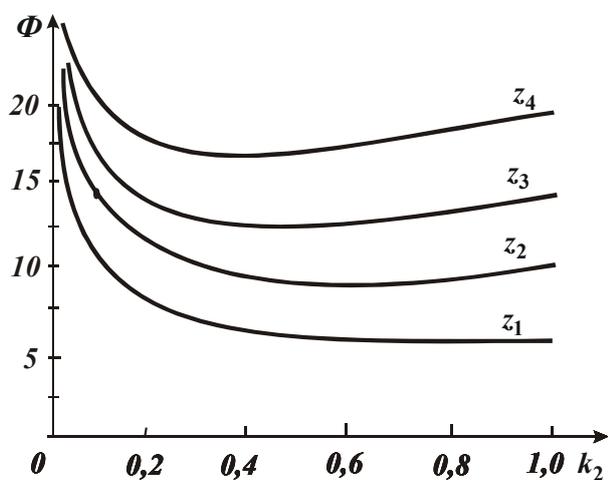


Рис. 3. Изменение безразмерной функции  $\Phi$  от безразмерного коэффициента  $k_2$ .

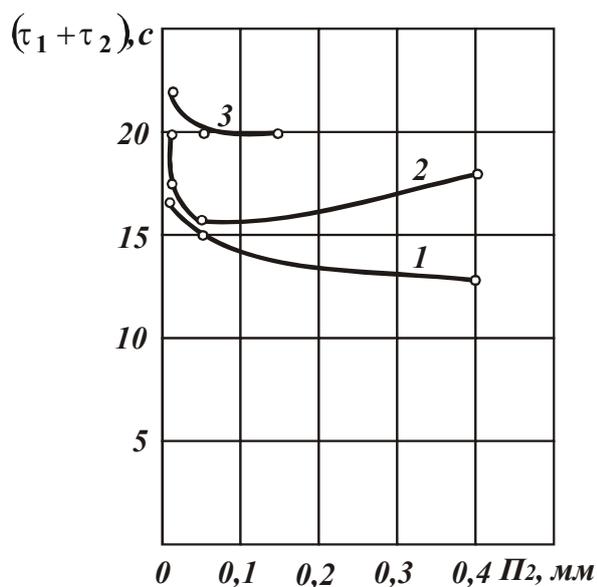


Рис. 4. Зависимости времени цикла шлифования  $(\tau_1 + \tau_2)$  от припуска  $P_2$  (на этапе выхаживания): 1 – при шлифовании “острым” алмазным кругом (после его электроэрозионной правки); 2 – при шлифовании приработанным алмазным кругом; 3 – при шлифовании алмазным кругом с притупленными режущими кромками (после обтачивания круга алмазным правящим карандашом).

ла  $(\tau_1 + \tau_2)$  с уменьшением припуска  $P_2$  непрерывно увеличивается (кривая 1). При шлифовании приработанным алмазным кругом, обладающим более низкой режущей способностью, время цикла  $(\tau_1 + \tau_2)$  с уменьшением припуска  $P_2$  изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку минимума (кривая 2). При шлифовании алмазным кругом с притупленными режущими кромками (после обтачивания круга алмазным правящим карандашом), обладающим еще более низкой режущей способностью, время цикла  $(\tau_1 + \tau_2)$  с уменьшением припуска  $P_2$  увеличивается и принимает наибольшее значение (кривая 3). Из этого вытекает, что чем ниже режущая способность круга, тем больше время цикла шлифования  $(\tau_1 + \tau_2)$ . Приведенные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами расчетов, показанными на рис. 3.

Пример расчета параметров цикла шлифования. Для  $\delta_o = 0,005$  мм и  $k_0 = 0,01$  максимальная величина снимаемого припуска  $P = \frac{\delta_o}{k_0} = 0,5$  мм. С

В диапазоне изменения коэффициента  $k_2 = 1,0 \dots 0,2$  при  $z_1 = 1$  безразмерная функция  $\Phi$  изменяется мало (увеличивается всего в 1,4 раза). Следовательно, можно рекомендовать для практического применения цикл шлифования, включающий этап черного шлифования (реализующий значения  $k_2 = 1,0 \dots 0,2$ ) и этап выхаживания.

Для оценки достоверности теоретических решений экспериментально установлены зависимости изменения времени цикла шлифования  $(\tau_1 + \tau_2)$  от величины снимаемого припуска  $P_2$  при круглом наружном врезном шлифовании твердосплавного инструмента алмазным кругом на металлической связке М1-10, рис. 4. Условия обработки:  $P = 0,5$  мм;  $\delta_0 = 0,01$  мм.

При шлифовании “острым” алмазным кругом (после его электроэрозионной правки) время цикла

учетом допустимого диапазона изменения коэффициента  $k_2 = 1,0 \dots 0,2$ , величина снимаемого припуска  $\Pi_2$  может изменяться в диапазоне  $0,5 \dots 0,1$  мм. Соответственно  $\Pi_1 = \Pi - \Pi_2 = 0 \dots 0,4$  мм. Следовательно, на этапе чернового шлифования допустимо снятие припуска величиной  $\Pi_1 = 0 \dots 0,4$  мм, а на этапе выхаживания – снятие припуска величиной  $\Pi_2 = 0,5 \dots 0,1$  мм.

Время оптимального цикла шлифования равно  $\tau = (\tau_1 + \tau_2) = \tau_2$ :

$$\tau = \frac{F}{c \cdot V_{кр}} \cdot \frac{\sigma}{K_{ш}} \cdot \ln \frac{\Pi}{\delta_0}. \quad (14)$$

Исходя из зависимости (14), уменьшить время  $\tau$  можно уменьшением площади обрабатываемой детали  $F$ , величины снимаемого припуска  $\Pi$ , соотношения  $\sigma / K_{ш}$  и увеличением приведенной жесткости технологической системы  $c$ , скорости круга  $V_{кр}$  и величины  $\delta_0$ , определяющей точность размера обрабатываемой поверхности.

Соотношение  $\sigma / K_{ш}$  можно выразить через параметры обработки, используя известные зависимости, приведенные в работе [4], тогда

$$\frac{\sigma}{K_{ш}} = \frac{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot HV}{2 \cdot \left( 1 - \frac{x}{x + H_{max}} \right)}, \quad (15)$$

где  $HV$  - твердость (по Виккерсу) обрабатываемого материала, Н/м<sup>2</sup>;  $\gamma$  - половина угла при вершине зерна, рабочая часть которого представлена в форме усеченного конуса;  $\eta = x / (x + H_{max})$  - безразмерный коэффициент, изменяется в пределах  $0 \dots 1$ ;  $x$  - условная величина линейного износа зерна, м;  $H_{max}$  - максимальная толщина среза, м.

Уменьшить величину  $x$  можно применением алмазных кругов и обеспечением их высокой режущей способности за счет работы круга в режиме интенсивного самозатачивания или за счет применения непрерывной или периодической эффективной правки алмазного круга на металлической связке. Главное при этом – обеспечить своевременное удаление с рабочей поверхности алмазного круга затупившихся зерен, непрерывно подключая в работу нижерасположенные новые (неизношенные) зерна.

Увеличить параметр  $H_{max}$  можно за счет более глубокого внедрения режущих зерен в обрабатываемый материал. Для этого необходимо увеличить максимальную высоту выступания режущих зерен над уровнем связки алмазного круга, что достигается применением электроэрозионной или электрохимической правки алмазного круга на металлической связке, рис. 5.

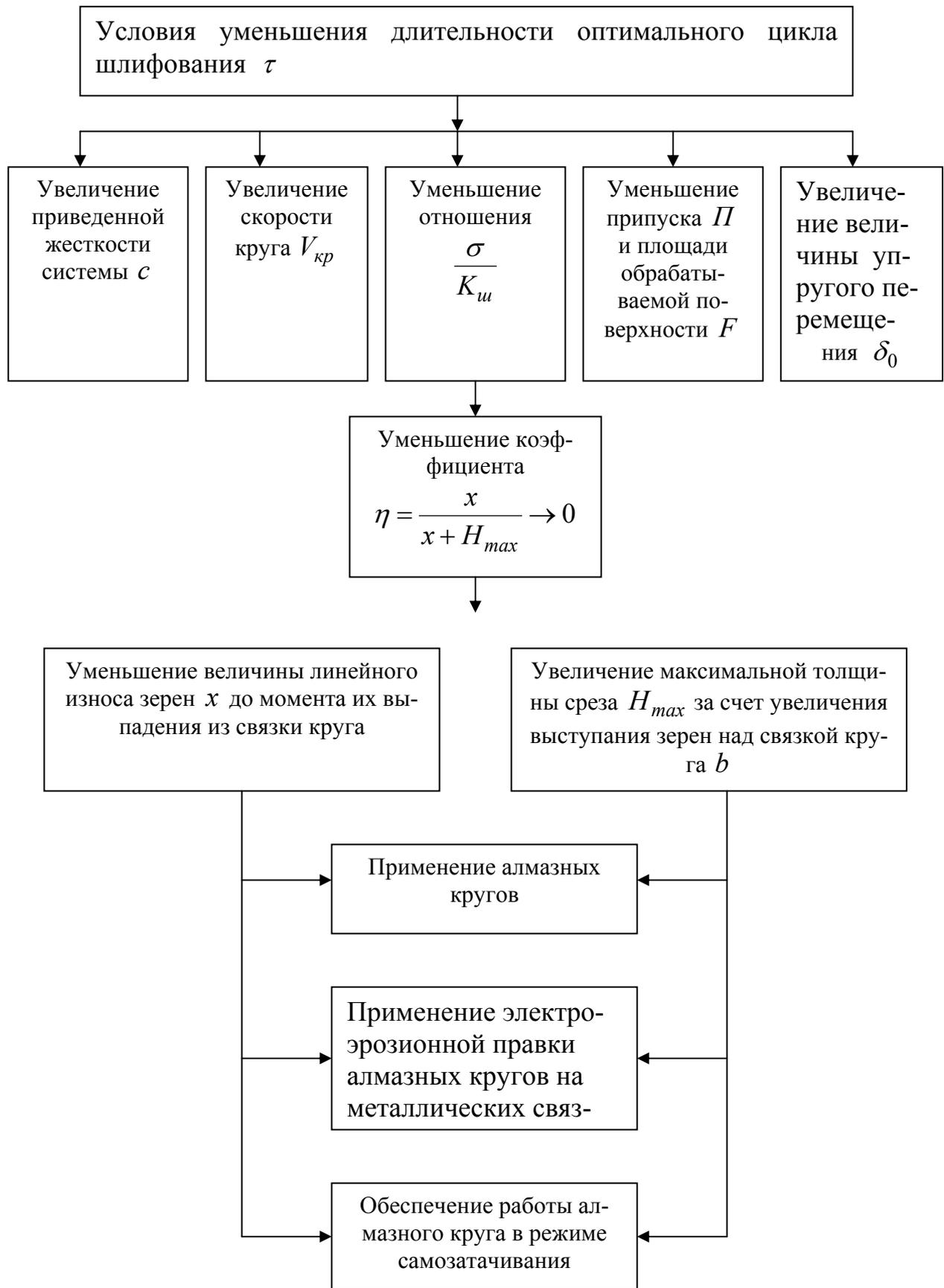


Рис. 5. Структурная схема условий уменьшения длительности оптимального цикла шлифования.

Приведенные результаты теоретических и экспериментальных исследований раскрывают новые резервы эффективного использования ал-

мазных кругов при шлифовании нежестких деталей, требующих применения определенных циклов шлифования с целью обеспечения максимально возможной производительности шлифования и требований по точности.

### **Список литературы**

1. Корчак С.Н. Прогрессивная технология и автоматизация круглого шлифования. – М.: Машиностроение, 1968. – 108 с.
2. Лурье Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. – Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1984. – 103 с.
3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 4. "Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с.
4. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.

### **Анотація**

#### **Параметрична оптимізація циклу круглого зовнішнього подовжнього алмазного шліфування спеціальних твердосплавних інструментів**

*У роботі на основі теоретичних і експериментальних досліджень проведена параметрична оптимізація циклу круглого зовнішнього подовжнього алмазного шліфування спеціальних твердосплавних інструментів за критерієм максимальної продуктивності з урахуванням обмеження по точності обробки.*

### **Abstract**

#### **Параметрическая оптимизация цикла круглого наружного продольного алмазного шлифования специальных твердосплавных инструментов**

*В работе на основе теоретических и экспериментальных исследований проведена параметрическая оптимизация цикла круглого наружного продольного алмазного шлифования специальных твердосплавных инструментов по критерию максимальной производительности с учетом ограничения по точности обработки*