

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРЕЦИЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Дитиненко С.А., Новиков Ф.В., докт. техн. наук
(г. Харьков, Украина)

В работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований условий повышения эффективности технологии прецизионной обработки цилиндрических поверхностей специальных твердосплавных инструментов в авиационном производстве

Развитие авиационной промышленности, чрезвычайно высокие требования к изготовлению деталей и агрегатов авиационного назначения из материалов повышенной твердости, характеризующихся низкой обрабатываемостью, требуют применения наряду с ГОСТовскими инструментами множества разнообразных по конфигурации и геометрическим размерам специальных многолезвийных твердосплавных режущих инструментов (комбинированных зенкеров, разверток, сверл, фрез и т.д.). Данные инструменты в большинстве случаев отличаются высокими требованиями к качеству обработки рабочих поверхностей. Например, шероховатость обработки - на уровне $R_a = 0,1$ мкм, тогда как для обычных инструментов $R_a = 0,3$ мкм и более. Возникает необходимость съема больших припусков: при обработке последней ступени твердосплавного зенкера – до 10 мм и более.

Применение традиционных технологий обработки указанных инструментов, включающих операции шлифования абразивными и алмазными кругами, операции доводки алмазными пастами, характеризуются высокой трудоемкостью обработки, в особенности на операциях доводки. Это требует совершенствования технологий шлифования с целью снижения трудоемкости операций доводки, а в лучшем случае – исключение их из технологических процессов обработки, обеспечивая требуемые показатели качества обработки на операциях шлифования. Перспективным направлением решения данных задач является применение технологий шлифования алмазными кругами на металлических связках, которые обладают большими технологическими возможностями в плане повышения производительности и снижения технологической себестоимости обработки. Однако, как известно, данные технологии не обеспечивают высоких показателей шероховатости и точности обработки, особенно в условиях шлифования с относительно низкой жесткостью технологической системы, что имеет место при круглом наружном шлифовании специальных осевых твердосплавных режущих инструментов. Это требует разработки новых более эффективных технологий круглого наружного шлифования алмазными кругами на металлических связках, в том числе с применением электроэрозионной правки, позволяющих наряду с повышением производительности и снижением технологической себестоимости обработки улучшить параметры качества обработки (шероховатость и точность обрабатываемых поверхностей) до уровня показателей доводки свободным абразивом (алмазными пастами).

В работе предложено новое решение задачи выбора оптимальных параметров круглого наружного шлифования по критерию наибольшей производительности с учетом ограничения по точности и шероховатости обработки [1,2,3]. Теоретически показано, что в связи с возникновением в технологической системе упругого перемещения δ , фактическая производительность обработки Q_ϕ всегда меньше номинальной производительности $Q_{ном}$ на величину второго слагаемого зависимости:

$$Q_\phi = Q_{ном} \cdot \left(1 - \frac{\delta}{\Pi}\right); \quad \delta = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}, \quad (1)$$

где Π - снимаемый припуск, м; c - приведенная жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м; $K_{ш} = P_z / P_y$ - коэффициент шлифования; P_y , P_z - соответственно радиальная и тангенциальная составляющие силы резания при шлифовании, Н; σ - условное напряжение резания при шлифовании, Н/м²; $V_{кр}$ - скорость круга, м/с.

Уменьшение величины δ (определяющей точность размера обработки) требует уменьшения $Q_{ном}$. Однако, это не эффективно, т.к. при этом уменьшается Q_ϕ . Как показывает практика, эффективнее использовать цикл круглого наружного шлифования, включающий этапы шлифования и выхаживания. Тогда средняя фактическая производительность цикла шлифования $Q_{ср}$ определится:

$$Q_{ср} = \frac{Q_{ном}}{(1 + \tau_2 / \tau_1)}, \quad (2)$$

где τ_1, τ_2 - длительность этапов шлифования и выхаживания, с; $\tau_1 = \Pi / S_{non}$; S_{non} - поперечная подача, м/ход.

Для определения τ_2 получено дифференциальное уравнение интенсивности съема материала на этапе выхаживания:

$$\frac{dv}{d\tau} + A \cdot v = B, \quad (3)$$

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, м³; Π_1, Π_2 - припуски, удаляемые на этапах шлифования и выхаживания, м; F - площадь обрабатываемой цилиндрической поверхности, м².

С учетом начального условия $\delta / \tau=0 = \Pi_2$ решение уравнения (3) имеет вид:

$$Q_{\phi} = Q_{\phi_2} \cdot e^{-\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot F} \cdot \tau}, \quad \delta = \Pi_2 \cdot e^{-\frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot F} \cdot \tau}, \quad Q_{\phi_2} = \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \Pi_2}{\sigma}. \quad (4)$$

Основное время цикла круглого наружного шлифования:

$$(\tau_1 + \tau_2) = \frac{F}{c \cdot V_{кр}} \cdot \left(\frac{\sigma}{K_{ш}} \right)_1 \cdot \left[\frac{1}{k_2} + z \cdot \ln \left(\frac{k_2}{k_0} \right) \right] = \frac{F}{c \cdot V_{кр}} \cdot \left(\frac{\sigma}{K_{ш}} \right)_1 \cdot \Phi, \quad (5)$$

где $z = \left(\frac{\sigma}{K_{ш}} \right)_2 / \left(\frac{\sigma}{K_{ш}} \right)_1$ - безразмерный коэффициент, $z \geq 1$; индексы 1 и 2 соответствуют этапам шлифования и выхаживания; $k_2 = \Pi_2 / \Pi$; $k_0 = \delta_0 / \Pi$; δ_0 - точность размера обработки, м.

Случай 1 ($z = 1$). Как следует из рис. 1,а, наименьшее значение безразмерной функции Φ (определяющей основное время цикла шлифования) достигается при $\tau_1 = 0$, т.е. оптимальный цикл шлифования включает лишь этап выхаживания (и естественно, непродолжительный этап создания начального натяга в технологической системе).

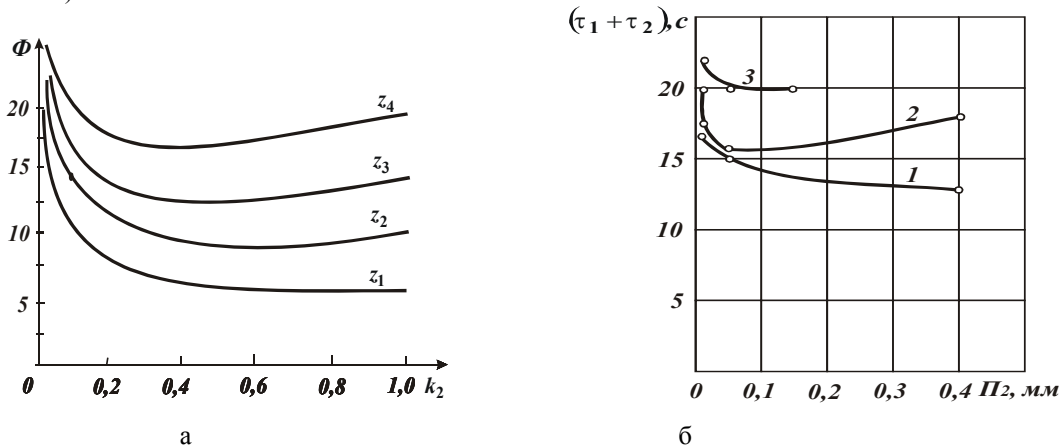


Рис. 1. Изменение безразмерной функции Φ от безразмерного коэффициента k_2 ($z_1 = 1$, $z_2 = 2$, $z_3 = 3$, $z_4 = 4$) (а) и зависимости времени цикла шлифования $(\tau_1 + \tau_2)$ от припуска Π_2 (на этапе выхаживания): 1 – при шлифовании “острым” алмазным кругом (после его электроэрозионной правки); 2 – при шлифовании приработанным алмазным кругом; 3 – при шлифовании алмазным кругом с притупленными режущими кромками (после обтачивания круга алмазным правящим карандашом) (б).

Случай 2 ($z > 1$). Исходя из рис. 1,а, для $z > 1$ безразмерная функция Φ с увеличением коэффициента k_2 изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку минимума. С увеличением z экстремальные значения функции Φ увеличиваются и смещаются в область меньших значений k_2 . Это указывает на значительное влияние коэффициента z (определяющего режущую способность круга) на структуру цикла шлифования. Чем “острее” круг, тем эффективнее удалять большую часть припуска на этапе выхаживания. При шлифовании недостаточно “острым” кругом практически весь припуск необходимо удалить на этапе шлифования и лишь незначительную его часть – на этапе выхаживания. Теоретические результаты проверены экспериментально, рис. 1,б. При шлифовании “острым” алмазным кругом на металлической связке М1-10 (после электроэрозионной правки, кривая 1) время $(\tau_1 + \tau_2)$ с увеличением Π_2 непрерывно уменьшается, что соответствует кривой $z = 1$ на рис. 1,а. При шлифовании приработанным алмазным кругом зависимость $(\tau_1 + \tau_2) - \Pi_2$ трансформируется в экстремальную, что соответствует кривым для $z > 1$ на рис. 1,а. При шлифовании алмазным кругом (после электроэрозионной правки, а затем его обтачивания алмазным правящим карандашом, т.е. со значительными площадками износа на зернах), зависимость $(\tau_1 + \tau_2)$ от Π_2 реализуется лишь для небольших значений Π_2 . В результате основная часть припуска удаляется на этапе шлифования. Этим подтверждены теоретические результаты.

Длительность оптимального цикла шлифования, включающего лишь этап выхаживания, определяется зависимостью:

$$\tau = \frac{F}{c \cdot V_{кр}} \cdot \frac{\sigma}{K_{ш}} \cdot \ln \frac{\Pi}{\delta_0}, \quad (6)$$

где $\frac{\sigma}{K_{ш}} = \frac{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot HV}{2 \cdot (1 - \eta)}$; $\eta = \frac{x}{(x + H_{max})}$; HV - твердость (по Виккерсу) обрабатываемого материала, Н/м²; γ - половина угла при вершине режущего зерна, рабочая часть которого представлена в форме усеченного конуса; η - безразмерный коэффициент, изменяется в пределах 0...1; x - условная величина линейного износа зерна, м; H_{max} - максимальная толщина среза, м.

Уменьшить τ (т.е. повысить производительность цикла круглого наружного шлифования) с учетом ограничений по точности обработки можно уменьшением отношения $\sigma / K_{ш}$. Это соответствует уменьшению безразмерного коэффициента $\eta \rightarrow 0$ за счет уменьшения величины линейного износа зерна $x \rightarrow 0$ и увеличения максимальной толщины среза H_{max} .

Установлено, что при круглом наружном шлифовании параметр H_{max} (или a_z) больше параметра шероховатости обработки R_{max} . Между этими параметрами существует связь: $H_{max} = \alpha \cdot R_{max}$, где α - безразмерный коэффициент, $\alpha > 1$. Тогда коэффициент η можно аналитически выразить

$$\eta = \frac{x}{x + \alpha \cdot R_{max}}. \quad (7)$$

Как видим, уменьшение параметра R_{max} ведет к увеличению безразмерного коэффициента η , а это приведет к снижению производительности обработки. Следовательно, коэффициент η по-разному влияет на производительность и шероховатость обработки: с уменьшением η производительность увеличивается, а шероховатость уменьшается. Практически исключить влияние параметра шероховатости обработки R_{max} на коэффициент η , исходя из зависимости (7), можно увеличением величины линейного износа зерна x , обеспечивая выполнение условия $x \gg R_{max}$, т.е. создавая на режущих зернах значительные площадки износа. Очевидно, реализация данного условия приводит к тому, что коэффициент $\eta \rightarrow 1$, а это ведет к снижению производительности обработки.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтвердили правомочность данного условия. За счет образования на режущих зернах значительных площадок износа (т.е. увеличения величины x) удалось в 10-20 раз уменьшить шероховатость обработки до требуемого уровня $R_a = 0,1$ мкм и ниже. Безразмерный коэффициент η при этом увеличился до значения $\eta = 0,91$. Оценим, в какой степени это повлияло на уменьшение производительности цикла круглого наружного алмазного шлифования. Для этого обратимся к экспериментально установленным данным, приведенным на рис. 1,б. При шлифовании алмазным кругом на металлической связке М1-01 сразу после его интенсивной электроэрозионной правки суммарное время цикла шлифования приблизительно в два раза меньше, чем при шлифовании тем же алмазным кругом после его обтачивания алмазным правящим карандашом. Следовательно, за счет притупления режущих кромок зерен мы уменьшаем производительность обработки лишь в 2 раза, обеспечивая при этом уменьшение шероховатости обработки в 10-20 раз. Иными словами, проигрывая по производительности лишь в 2 раза, мы выигрываем по шероховатости обработки в 10-20 раз, что указывает на эффективность шлифования алмазным кругом на металлической связке после его обтачивания алмазным правящим карандашом (с целью притупления режущих кромок зерен).

На рис. 2 приведены экспериментальные значения производительности и шероховатости обработки при шлифовании алмазным кругом на металлической связке М1-01 после его электроэрозионной правки, а так же после обтачивания алмазным правящим карандашом. Здесь же показаны достигаемые значения коэффициента η .

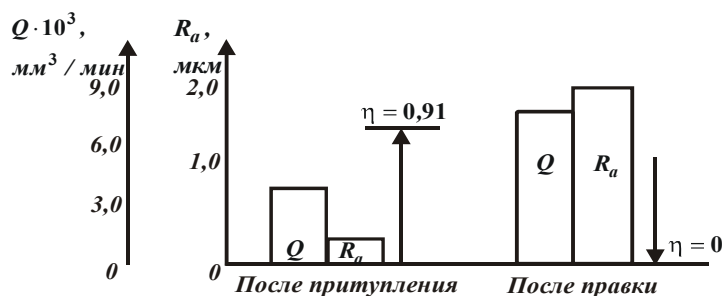


Рис. 2. Значения производительности Q и шероховатости обработки R_a при шлифовании алмазным кругом на металлической связке после притупления режущих кромок и после его электроэрозионной правки.

Нами проводились экспериментальные исследования мощности шлифования указанным выше алмазным кругом после его электроэрозионной правки и после притупления режущих кромок путем обтачивания круга алмазным правящим карандашом, табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные значения мощности шлифования N , Вт (условия шлифования – алмазный круг 1А1 300x20x5 АС6 125/100 М1-10 4, $V_{кр} = 30$ м/с; $V_{дет} = 10$ м/мин; $t = 0,1$ мм; $S_{np} = 5$ мм/об, обр. материал:

твердый сплав ВК8)

После электроэрозионной правки круга	После обтачивания круга алмазным карандашом
190	380

Как следует из табл. 1, в первом случае мощность шлифования в 2 раза меньше, чем во втором. Представим мощность шлифования N зависимостью

$$N = P_z \cdot V_{кр} = \sigma \cdot \frac{Q}{V_{кр}} \cdot V_{кр} = \sigma \cdot Q, \quad (8)$$

где P_z - тангенциальная составляющая силы резания, Н; σ - условное напряжение резания, Н/м²; Q - производительность обработки, м³/с.

При $Q = const$ увеличение мощности шлифования N возможно за счет увеличения условного напряжения резания σ . Согласно приведенным выше зависимостям, увеличение σ происходит в результате увеличения безразмерного коэффициента $\eta = \frac{x}{x + H_{max}}$. Следовательно, увеличение в 2 раза мощности шлифования N произошло в результате увеличения коэффициента η .

Если условно принять, что после электроэрозионной правки алмазного круга на металлической связке коэффициент $\eta = 0$, то для того чтобы произошло увеличение условного напряжения резания σ (и соответственно мощности шлифования N) в 2 раза, коэффициент η должен принять значение $\eta = 0,75$. Учитывая то, что даже после электроэрозионной правки круга $\eta > 0$, то после обтачивания круга алмазным правящим карандашом коэффициент η будет превышать значение 0,75. Следовательно, коэффициент η может приблизиться к значению $\eta = 0,91$, установленному в третьем разделе работы при исследовании шероховатости обработки.

Для сравнения по критерию наибольшей производительности обработки рассмотрим 3 варианта технологического процесса обработки цилиндрической поверхности специального твердосплавного режущего инструмента (развертки), табл. 2. Первый и второй варианты обоснованы выше, третий – базовый вариант, используемый в авиационном производстве Харьковского машиностроительного завода “ФЭД”.

Как видим, первый вариант обеспечивает наименьшее время обработки, т.е. наибольшую производительность, не требует применения операции доводки алмазной пастой. Необходимая шероховатость обработки $R_a = 0,1$ мкм формируется на операции круглого наружного продольного шлифования в результате использования цикла, включающего этапы шлифования и выхаживания. Этап выхаживания обеспечивает точность размера обрабатываемой поверхности в пределах 0,01 мм.

Производительность обработки при круглом наружном продольном шлифовании алмазным кругом на органической связке В2-01 меньше, чем при шлифовании алмазным кругом на металлической связке М1-10 (как после электроэрозионной правки круга, так и после его обтачивания алмазным правящим карандашом).

Таблица 2

Сравниваемые варианты технологического процесса обработки цилиндрической поверхности специального твердосплавного режущего инструмента – развертки (диаметр – 20 мм, длина – 30 мм, припуск - 1 мм)

№ варианта	Операция круглого наружного продольного шлифования	Операция доводки алмазной пастой	Время обработки, мин.
1	Алмазный круг 1А1 300x20x5 АС6 125/100 М1-10 4 после электроэрозионной правки и обтачивания алмазным правящим карандашом; $R_a = 0,1$ мкм; $\tau = 2$ мин.	Нет	2
2	Алмазный круг 1А1 300x20x5 АС6 125/100 М1-10 4 после электроэрозионной правки; $R_a = 1,0$ мкм; $\tau = 1$ мин.	Припуск – 0,02 мм; $R_a = 0,1$ мкм; $\tau = 4$ мин.	5
3	Алмазный круг 1А1 300x20x5 АС4 100/80 В2-01 4; $R_a = 0,4$ мкм; $\tau = 3$ мин.	Припуск – 0,02 мм; $R_a = 0,1$ мкм; $\tau = 4$ мин.	7

Проведем анализ технологической себестоимости обработки в соответствии с зависимостью, приведенной в работе [4], учитывающей две основные изменяющиеся статьи затрат:

$$C = a_1 \cdot q + \frac{a_2}{Q \cdot \rho_m}, \quad (9)$$

где a_1 - стоимость алмазного порошка в инструменте, грн/мг; a_2 - зарплата рабочего, грн/с; q - удельный расход алмаза, мг/г; ρ_m - плотность обрабатываемого материала, г/мм³; Q - производительность обработки, мм³/с.

Из зависимости (9) следует, что первое слагаемое обусловлено расходом алмазного порошка инструмента, а второе – производительностью обработки. С увеличением производительности обработки Q технологическая себестоимость обработки C уменьшается. Следовательно, второе слагаемое зависимости (9) будет наименьшим для первого рассматриваемого варианта технологического процесса (табл. 1).

Нами были проведены экспериментальные исследования удельного расхода алмаза q при шлифовании алмазным кругом 1А1 300х20х5 АС6 125/100 М1-10 4 (после его электроэрозионной правки, а также после его обтачивания алмазным правящим карандашом) и алмазным кругом 1А1 300х20х5 АС4 100/80 В2-01 4. Наименьший удельный расход алмаза q достигается при шлифовании алмазным кругом на металлической связке М1-10 после его обтачивания алмазным правящим карандашом.

Исходя из этого, можно заключить, что для первого варианта технологического процесса обеспечивается наименьшее первое слагаемое зависимости (9). Следовательно, наименьшая технологическая себестоимость обработки C достигается по первому варианту технологического процесса. Поэтому его необходимо рекомендовать для практического применения.

Список литературы:

1. Новиков Ф.В., Дитиненко С.А. Технология и теория прецизионной обработки твердосплавных инструментов алмазными кругами на металлических связках. – Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. Труды 8-й Межд. научн.-техн. конф., 9-10 декабря 2003 г. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2003. – С. 34-39.
2. Дитиненко С.А. Кинематические схемы формирования шероховатости поверхности при шлифовании // Високі технології в машинобудуванні. Збірка наукових праць НТУ “ХПІ”. - Харків: НТУ “ХПІ”, 2003. – Вип. 1(8). – С. 34-42.
3. Дитиненко С.А. Параметрическая оптимизация цикла круглого наружного продольного алмазного шлифования специальных твердосплавных инструментов // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. “Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні” – Харків: ХДТУСГ, 2004. – Вип. 26. – С. 61-70.
4. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования. – Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Одесса: ОГПУ, 1995. – 36 с.