

И.А. РЯБЕНКОВ, канд. техн. наук, ГП ХМЗ «ФЭД», Харьков

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ НА ОПЕРАЦИЯХ ШЛИФОВАНИЯ

Проведен теоретический анализ технологических возможностей повышения точности и производительности обработки при использовании схемы шлифования с начальным натягом в технологической системе, то есть применяемой на практике схемы выхаживания. Для этого получено аналитическое решение задачи определения величины упругого перемещения при шлифовании с начальным заданным натягом в технологической системе. Показано, что с течением времени обработки величина упругого перемещения уменьшается по экспоненциальному закону, принимая значения, соответствующие условиям высокоточной обработки деталей машин. Определено время обработки, за которое достигается требуемая (заданная) точность обработки. Это позволяет научно обоснованно расчетным путем определить оптимальные параметры обработки, исходя из требований по точности обрабатываемой поверхности.

Ключевые слова: шлифование, сила резания, точность обработки, упругое перемещение, начальный натяг, технологическая система, производительность обработки, время обработки.

Введение. Шлифование является одним из основных механических методов обеспечения высоких показателей точности и качества обрабатываемых поверхностей деталей машин. Широко применяется шлифование деталей из конструкционных сталей после их термической обработки. В настоящее время накоплен большой опыт обработки материалов шлифованием. В работе *проф. Якимова А.В.* [1] предложено производить шлифование прерывистыми кругами, что обеспечивает снижение силовой и тепловой напряженности процесса резания и соответственно повышение точности и качества обработки. Эффективно также использование схемы шлифования с начальным натягом в технологической системе, то есть применяемой на практике *схемы выхаживания*. Это связано с всевозрастающими требованиями к точности обработки деталей машин, в особенности изготовленных из материалов с повышенными физико-механическими свойствами.

Анализ последних достижений. В работах [2, 3] показано, что обеспечение высокой точности обработки, как правило, требует уменьшения производительности, что не всегда экономически целесообразно. В этих случаях эффективно использовать *метод шлифования с выхаживанием*, то есть с отключенной радиальной подачей на окончательном этапе шлифования. Это не приводит к существенному уменьшению производительности, однако позволяет добиться требуемой точности обработки. Вместе с тем, в научно-технической литературе фактически не произведена оценка технологических возможностей этого метода шлифования с точки зрения повышения точности и производительности обработки, поскольку отсутствует аналитическое описание закономерностей изменения упругих перемещений, возникающих в технологической системе при шлифовании с заданным начальным натягом. Это не позволяет определить условия обеспечения заданной точности обработки при шлифовании, что имеет важное практическое значение.

Постановка задачи. В работе решается задача обеспечения точности и производительности обработки при шлифовании с начальным заданным натягом в технологической системе на основе аналитического описания закономерностей уменьшения во времени величины упругого перемещения, определяющего погрешность обработки.

Математическая модель. Для решения поставленной задачи следует воспользоваться расчетной схемой шлифования прямолинейной детали, движущейся по нормали к рабочей поверхности круга с переменной во времени скоростью $V_{\text{дем}}$ [4]. Радиальная P_y составляющая силы резания в этом случае описывается формулой:

$$P_y = c \cdot (P - \int V_{\text{дем}} \cdot \tau), \quad (1)$$

где c – приведенная жесткость технологической системы, Н/м; P – величина снимаемого припуска, равная начальному натягу в технологической системе, м; τ – время обработки, с.

В общем виде зависимость для определения радиальной составляющей силы резания принимает вид: $P_y = (\sigma / K_{\text{рез}}) \cdot (F \cdot V_{\text{дем}} / V_{\text{кр}})$ [4]. Тогда уравнение (1) опишется так:

$$\frac{\sigma}{K_{\text{рез}}} \cdot \frac{F \cdot V_{\text{дем}}}{V_{\text{кр}}} = c \cdot (P - \int V_{\text{дем}} \cdot \tau), \quad (2)$$

где σ – условное напряжение резания, Н/м²; $K_{\text{рез}} = P_z / P_y$; P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н; F – площадь поперечного сечения обрабатываемой прямолинейной детали, м²; $V_{\text{кр}}$ – скорость круга, м/с.

Дифференцируя каждое слагаемое уравнения (2) по времени обработки τ , имеем:

$$\frac{\sigma}{K_{\text{рез}}} \cdot \frac{F}{V_{\text{кр}}} \cdot \frac{dV_{\text{дем}}}{d\tau} = -c \cdot V_{\text{дем}}. \quad (3)$$

Представим уравнение (3) в виде

$$\frac{\sigma}{K_{\text{рез}} \cdot c} \cdot \frac{F}{V_{\text{кр}}} \cdot \frac{dV_{\text{дем}}}{V_{\text{дем}}} = -d\tau, \quad (4)$$

и получим дифференциальное уравнение первого порядка относительно неизвестной величины $V_{\text{дем}}$. Его решение:

$$\frac{\sigma}{K_{\text{рез}} \cdot c} \cdot \frac{F}{V_{\text{кр}}} \cdot \ln V_{\text{дем}} = -\tau + C_1, \quad (5)$$

где C_1 – постоянная интегрирования.

Для определения неизвестной величины C_1 необходимо в зависимости (5) выразить $V_{\text{дем}}$ через величину упругого перемещения

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{\sigma}{K_{\text{рез}} \cdot c} \cdot \frac{F \cdot V_{\text{дем}}}{V_{\text{кр}}}. \quad (6)$$

Откуда

$$V_{\text{дем}} = \frac{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}}}{\sigma \cdot F} \cdot y. \quad (7)$$

Подставляя зависимость (7) в уравнение (5), получим:

$$\tau_0 \cdot \ln \frac{y}{\tau_0} = -\tau + C_1, \quad (8)$$

где $\tau_0 = \frac{\sigma \cdot F}{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}}}.$

С учетом начального условия $y(\tau = 0) = \Pi$ имеем

$$C_1 = \tau_0 \cdot \ln \frac{\Pi}{\tau_0}. \quad (9)$$

Тогда зависимость (5) после преобразований примет вид:

$$\ln \frac{y}{\Pi} = -\frac{\tau}{\tau_0}. \quad (10)$$

Откуда

$$\frac{y}{\Pi} = e^{-\frac{\tau}{\tau_0}} = e^{-\frac{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot \tau}{\sigma \cdot F}}. \quad (11)$$

Как видно, с течением времени обработки τ величина упругого перемещения y уменьшается по экспоненциальному закону, принимая наибольшее значение (равное величине Π) в начале обработки.

Радиальная составляющая силы резания с учетом зависимости (11) аналитически выразится так:

$$P_y = c \cdot \Pi \cdot e^{-\frac{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot \tau}{\sigma \cdot F}} = P_{y_{\text{max}}} \cdot e^{-\frac{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot \tau}{\sigma \cdot F}} = P_{y_{\text{max}}} \cdot e^{-\frac{\tau}{\tau_0}}, \quad (12)$$

где $P_{y_{\text{max}}} = c \cdot \Pi$ – максимальное значение радиальной составляющей силы резания, Н.

Соответственно, скорость детали $V_{\text{дем}}$, описываемая зависимостью (7), примет вид:

$$V_{\text{дем}} = \frac{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}}}{\sigma \cdot F} \cdot \Pi \cdot e^{-\frac{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot \tau}{\sigma \cdot F}} = \frac{\Pi}{\tau_0} \cdot e^{-\frac{\tau}{\tau_0}}. \quad (13)$$

Исходя из зависимости (13), с физической точки зрения величина τ_0 определяет время съема припуска Π с постоянной скоростью $V_{\text{дем}} = \Pi / \tau_0$. Следовательно, чем меньше время τ_0 , тем больше $V_{\text{дем}}$. Согласно зависимости $\tau_0 = (\sigma \cdot F) / (K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}})$, уменьшить время τ_0 можно уменьшением отношения $\sigma / K_{\text{рез}}$, F и увеличением c и $V_{\text{кр}}$.

Результаты расчетов. На рис. 1 и в табл. 1 показан характер изменения величины упругого перемещения y и скорости съема припуска $V_{\text{дем}}$ от отношения τ / τ_0 для $\Pi = 1$ мм.

Как видно, при $\tau/\tau_0 = 6 \dots 7$ величина упругого перемещения y , определяющая погрешность обработки, принимает весьма малые значения 2,5 ... 0,9 мкм, которые соответствуют требованиям высокоточной обработки деталей.

Для исходных данных, полученных при торцовом алмазном шлифовании твердосплавных пластин ($\sigma = 150 \cdot 10^3$ Н/мм²; $K_{pez} = 0,2$; $F = 100$ мм²; $c = 1,5 \cdot 10^3$ Н/мм; $V_{кр} = 30$ м/с), время $\tau_0 = 1,67$ с. Поэтому, через $\tau = 7 \times 1,67 = 11,7$ с шлифования припуск величиной $\Pi = 1$ мм может быть полностью удален с высокой точностью обработки (с погрешностью обработки $y \approx 1$ мкм). При этом максимальная скорость съема припуска равна

$$V_{dem,max} = \frac{\Pi}{\tau_0} = \frac{1\text{мм}}{1,67\text{с}} = 0,6 \text{ мм/с}, \text{ а средняя } - V_{dem} = \frac{\Pi}{\tau} = \frac{1\text{мм}}{11,7\text{с}} = 0,085 \text{ мм/с},$$

то есть максимальная скорость съема припуска почти в 10 раз превышает среднюю скорость (рис. 1, б).

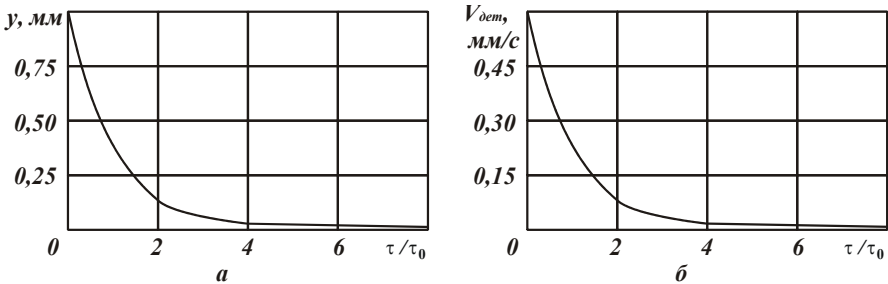


Рис. 1 – Зависимости параметров шлифования y и V_{dem} от отношения τ/τ_0 :
 а – упругое перемещение; б – скорость съема припуска.

Таблица 1 – Расчетные значения y и V_{dem}

τ/τ_0	0	1	2	3	4	5	6	7
y , мм	1	0,368	0,135	0,05	0,018	0,0067	0,0025	0,0009
V_{dem} , мм/с	0,6	0,22	0,081	0,03	0,01	0,004	0,0015	0,00054
Π/y	1	2,71	7,4	20	55,5	149,2	400	1111

При шлифовании с фиксированной скоростью детали V_{dem} величина упругого перемещения y определяется зависимостью (6), которая после преобразований принимает вид:

$$y = \tau_0 \cdot V_{dem} = \tau_0 \cdot \frac{\Pi}{\tau}. \quad (14)$$

Откуда

$$\frac{\tau}{\tau_0} = \frac{\Pi}{y}. \quad (15)$$

Как следует из зависимости (14), добиться заданного значения y можно за счет пропорционального уменьшения V_{dem} , а соответственно и производительности обработки.

В табл. 1 приведены расчетные значения отношения Π/y , которые изменяются в широких пределах. Следовательно, для обеспечения заданной точности обработки, например определяемой условием $y = 0,0009$ мм, требуется уменьшить V_{dem} , а, соответственно, и производительности обработки, в 1111 раз, тогда как при шлифовании по схеме с начальным натягом в технологической системе требуется увеличить отношение τ/τ_0 (соответственно уменьшить производительность обработки) всего в 7 раз. Это свидетельствует о высокой эффективности применения данной схемы шлифования, то есть шлифование с переменной (уменьшающейся во времени по экспоненциальному закону) скоростью съема припуска V_{dem} позволяет существенно повысить точность обработки без уменьшения производительности обработки. Полученное теоретическое решение подтверждается практикой шлифования.

Наряду с повышением точности обработки, данная схема шлифования за счет уменьшения во времени скорости съема припуска V_{dem} позволяет уменьшить шероховатость поверхности до требуемого уровня, что имеет большое практическое значение. Этим объясняется широкое применение на практике схемы шлифования с выхаживанием, то есть с начальным заданным натягом в технологической системе, что является, как правило, окончательным этапом операции шлифования, обеспечивающим высокие показатели точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей.

Перспективы дальнейших исследований. Автор считает перспективными направления исследований, связанные с разработкой на основе полученных теоретических решений эффективных технологий шлифования высокоточных деталей гидроаппаратуры, обеспечивая высокие показатели точности, качества и производительности обработки за счет научно обоснованного выбора оптимальных условий шлифования.

Выводы. В работе проведен теоретический анализ технологических возможностей повышения точности и производительности обработки при использовании схемы шлифования с начальным натягом в технологической системе, то есть применяемой на практике схемы выхаживания. Для этого получено аналитическое решение задачи определения величины упругого перемещения при шлифовании с начальным заданным натягом в технологической системе. Показано, что с течением времени обработки величина упругого перемещения уменьшается по экспоненциальному закону, принимая значения, соответствующие условиям высокоточной обработки деталей машин. Определено время обработки, за которое достигается требуемая (заданная) точность обработки. Это позволяет научно обоснованно расчетным путем определить оптимальные параметры обработки, исходя из требований по точности обрабатываемой поверхности.

Список литературы: 1. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. *Ф.В. Новикова, А.В. Якимова*. В десяти томах. – Т. 4. «Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов» – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802

с. 2. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с. 3. Попов С.А., Малевский Н.П., Терещенко Л.М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 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. 5. Рябенков И.А., Новиков Ф.В. Оценка влияния интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом на эффективность процесса шлифования // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 143 – 147.

Bibliography (transliterated): 1. *Fiziko-matematicheskaja teorija processov obrabotki materialov i tehnologii mashinostroenija*. Ed. F. V. Novikov, and A. V. Yakimov. V desjati tomah. Vol. 4. *Teorija abrazivnoj i almazno-abrazivnoj obrabotki materialov*. Odessa: ONPU, 2002. Print. 2. Maslov, E. N. *Teorija shlifovanija metallov*. Moscow: Mashinostroenie, 1974. Print. 3. Popov, S. A., N. P. Malevskij and L. M. Tereshhenko. *Almazno-abrazivnaja obrabotka metallov i tverdych splavov*. Moscow: Mashinostroenie, 1977. Print. 4. Yakimov, A. V., et al. *Teoreticheskie osnovy rezanija i shlifovanija materialov: utheb. posobie*. Odessa: OGPU, 1999. Print. 5. Rjabenkov, I. A., and F. V. Novikov. "Ocenka vlijanija intensivnosti trenija svjazki kruga s obrabatyvaemym materialom na effektivnost' processa shlifovanija." *Visnyk NTU «KhPI». Zbirnyk naukovyh prac'. Ser.: Innovacijni tehnologii' ta obladnannja obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurgii'*. No. 43 (1086). Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. 143–147. Print.

Поступила (received) 27.04.2015

УДК 532.5, 614.844, 621.227

А.Н. СЕМКО, д-р техн. наук., проф., ДонНУ, Донецк;
Ю.В. ШЕРСТЮК, аспирант, ДонНУ, Донецк

ГИДРОПУШКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

Описаны основные направления применения импульсных высокоскоростных струй жидкости в технологических процессах, их преимущества и недостатки, дальнейшие перспективы развития. Приведены схемы устройств, применяемых для получения ультраструй. Описано отличие в физике процессов, происходящих при втекании воды в сопло и истечении из него в гидропушке и импульсном водомете. Даны уравнения для расчета внутренней баллистики, а также конечно-разностная аппроксимация уравнений движения по методу Родинонова, адаптированному для расчета гидроимпульсных установок, который удовлетворяет требованиям монотонности, однородности, консервативности и имеет второй порядок аппроксимации по времени и координате.

Ключевые слова: импульсные струи жидкости, высокоскоростные струи, импульсный водомет, гидропушка.

Введение. Водоструйные технологии, основанные на применении струй жидкости высокой и сверхвысокой скорости (ультраструй), нашли широкое применение в различных отраслях промышленности, таких как прямолинейное и фасонное резание различных материалов (камень, металлы, пластмасса, кожа, и так далее), обработка бетонных поверхностей (резка, очистка, углубление), прецизионная обработка современных материалов (фигурная резка и изготовление отверстий заданной формы), разрушение горных пород и бетонных блоков, углубление акватории порта с каменистым дном, упрочнение металлических поверхностей наклепом при ударе струи, очистка корпусов судов от ракушек и старой краски, очистка внутренней поверхности труб от