

УДК 621.923

Ф. В. НОВИКОВ, И. А. РЯБЕНКОВ

УСЛОВИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО ШЛИФОВАНИЯ С НАЧАЛЬНЫМ НАТЯГОМ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Аналитически описан характер изменения во времени силы резания, интенсивности съема материала и величины упругого перемещения при шлифовании с начальным натягом в технологической системе. Показано, что эти параметры уменьшаются с течением времени обработки, обеспечивая требуемые показатели точности и качества обрабатываемых поверхностей. Это указывает на эффективность ее применения на окончательном этапе шлифования для обеспечения высокой точности обработки.

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

Введение. Повышение точности и качества обработки деталей машин из закаленных сталей требует применения эффективных процессов шлифования, обеспечивающих работу круга в режиме самозатачивания или периодической правки с целью поддержания его высокой режущей способности. К таким процессам следует отнести шлифование по упругой схеме и шлифование с заданным начальным натягом в технологической системе. Эти процессы позволяют регулировать изменение силы резания, исключая ее увеличение во времени, что важно при шлифовании с низкой жесткостью технологической системы. Для эффективного использования этих процессов шлифования необходимо знать их технологические возможности, основанные на результатах как экспериментальных, так и теоретических исследований. В связи с этим, представляется важным и актуальным разработка математической модели определения силы резания, интенсивности съема материала и величины упругого перемещения в технологической системе при шлифовании. Это позволит научно обоснованно подойти к установлению оптимальных параметров обработки, обеспечивающих требуемые показатели точности, качества и производительности.

Анализ последних достижений и литературы.

Исследование технологических параметров процесса шлифования с заданным начальным натягом в технологической системе нашло отражение в работах [1, 2]. В них приведены результаты экспериментальных исследований шлифования абразивными и алмазными кругами, в частности алмазно-искрового шлифования [3], основанного на введении в зону резания дополнительной электрической энергии в форме электрических разрядов. Это позволяет фактически исключить трение связки круга с обрабатываемым материалом и существенно повысить технологические показатели обработки. Показано также [1], что именно при работе абразивного круга в режиме затупления целесообразно использовать схему шлифования с начальным натягом в технологической системе. Это гарантированно обеспечивает снижение силы резания во времени и достижение требуемых показателей точности и шероховатости обработанной поверхности. Однако, до настоящего времени в научно-технической литературе отсутствуют теоретические (аналитические) основы указанного процесса шлифования, что не позволяет в полной мере раскрыть его физическую сущность и выявить технологические возможности, а

также научно обоснованно подойти к проектированию технологических процессов шлифования.

Цель работы, постановка проблемы. Целью работы является повышение точности, качества и производительности обработки при шлифовании с начальным натягом в технологической системе. Основной задачей работы является аналитическое описание технологических закономерностей формирования упругих перемещений, возникающих в технологической системе рассматриваемого процесса шлифования, и определение оптимальных условий его осуществления.

Материалы исследований. На практике, наряду с шлифованием по жесткой и упругой схемам, получила применение схема шлифования с начальным натягом в технологической системе, соответствующая, по сути, известной схеме выхаживания. Данная схема обеспечивает высокие показатели точности и качества обрабатываемых поверхностей за счет снижения силовой напряженности процесса обработки. В связи с этим важно провести теоретический анализ силовой напряженности данной схемы шлифования и упругих перемещений, возникающих в технологической системе и определяющих параметры точности обработки.

По физической сути рассматриваемая схема шлифования аналогична упругой схеме шлифования, осуществляемой с переменным (уменьшающимся во времени) радиальным усилием P_y , соответствующим радиальной составляющей силы резания. Это усилие равно упруго-восстанавливающей силе, возникающей в процессе шлифования [4]:

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

где P – величина снимаемого припуска, равная начальному натягу в технологической системе, м;

c – приведенная жесткость технологической системы, Н/м;

$V_{\text{дем.ср}}$ – средняя скорость съема материала за время обработки τ , м/с.

С учетом известного соотношения $P_y = \frac{\sigma}{K_{\text{рез}}} \cdot \frac{F \cdot V_{\text{дем.ср}}}{V_{\text{кр}}}$ [1] и указанного выше условия

$P_y = P$, получено:

$$V_{\text{дем.сп}} = \frac{\Pi}{\left(\tau + \frac{\sigma \cdot F}{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}}} \right)}, \quad (2)$$

где σ – условное напряжение резания, Н/м²;

$K_{\text{рез}} = P_z / P_y$ – коэффициент резания;

P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н;

F – площадь поперечного сечения обрабатываемой прямолинейной детали, м²;

$V_{\text{кр}}$ – скорость круга, м/с.

Как следует из зависимости (2), с течением времени обработки τ средняя скорость съема материала $V_{\text{дем.сп}}$ уменьшается, причем в большей степени при меньшем значении второго слагаемого, входящего в знаменатель зависимости.

Радиальная P_y составляющая силы резания с учетом зависимости (2) и условия $P_y = P$ выразится:

$$P_y = \frac{c \cdot \Pi}{\left(1 + \frac{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot \tau}{\sigma \cdot F} \right)}. \quad (3)$$

Увеличение времени обработки τ , аналогично характеру изменения средней скорости съема материала $V_{\text{дем.сп}}$, приводит к уменьшению P_y . Этим и объясняется эффективность практического использования схемы шлифования с начальным натягом в технологической системе, поскольку на конечном этапе обработки выполняется условие $P_y \rightarrow 0$, а это способствует уменьшению величины упругого перемещения y , возникающего в технологической системе [5]:

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{\Pi}{\left(1 + \frac{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot \tau}{\sigma \cdot F} \right)}, \quad (4)$$

и повышению показателей точности и качества обрабатываемой поверхности, производительности обработки.

Необходимо отметить, что добиться повышения технологических показателей обработки в этом случае, исходя из зависимости (3), можно при условии $\frac{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot \tau}{\sigma \cdot F} > 1$. В противном случае выполняется условие $P_y \rightarrow c \cdot \Pi$, справедливое для упругой схемы шлифования. В итоге сложно добиться повышения технологических показателей обработки.

Несомненно, упругая схема шлифования, как показано выше, исключает отрицательное влияние времени обработки τ на силу резания, что имеет место

при шлифовании по жесткой схеме. Однако упругая схема шлифования уступает рассматриваемой схеме шлифования с начальным натягом в технологической системе с точки зрения обеспечения качества и точности обрабатываемых поверхностей.

Основным ограничением схемы шлифования с начальным натягом в технологической системе является величина начального натяга Π , которая должна принимать небольшие значения – меньшие величины снимаемого припуска. В этом случае съем заданного припуска следует производить за несколько переходов, периодически создавая в технологической системе начальные натяги, кратные величине припуска, что, несомненно, приводит к снижению эффективности процесса шлифования, связанной со снижением производительности обработки.

Полученное теоретическое решение справедливо для схемы шлифования с непрерывной скоростью радиальной подачи, реализуемой, например, при круглом врезном шлифовании с непрерывной во времени скоростью радиальной подачи S (рис. 1).

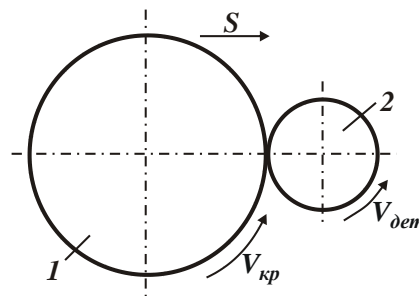


Рис. 1 – Схема круглого врезного шлифования:
1 – круг; 2 – деталь.

Вместе с тем, на практике получили применение схемы круглого и плоского шлифования с дискретной во времени скоростью радиальной подачи. Поэтому важно установить характер изменения съема материала для этой схемы шлифования на этапе выхаживания, т.е. при отключенной радиальной подаче, когда съем обрабатываемого материала происходит лишь под действием возникающей упруговосстанавливающей силы:

$$P = c \cdot (\Pi - n \cdot t_{\phi}), \quad (5)$$

где Π – величина снимаемого припуска при плоском шлифовании, м;

n – количество проходов круга при шлифовании;

t_{ϕ} – фактическая глубина шлифования на проходе, м.

В процессе выхаживания при плоском шлифовании сила P равна радиальной составляющей силы резания P_y , которая выражается следующей аналитической зависимостью:

$$P_y = \frac{\sigma}{K_{\text{рез}}} \cdot \frac{B \cdot V_{\text{дем}} \cdot t_{\phi}}{V_{\text{кр}}}, \quad (6)$$

где B – ширина шлифования, м;
 $V_{\text{дем}}$ – скорость вращения детали, м/с.

Подчиняя зависимость (6) условию $P_y = P$, получено уравнение относительно неизвестной величины – фактической глубины шлифования на проходе t_ϕ :

$$\frac{\sigma}{K_{\text{рез}}} \cdot \frac{B \cdot V_{\text{дем}} \cdot t_\phi}{V_{\text{кр}}} = c \cdot (\Pi - n \cdot t_\phi). \quad (7)$$

Откуда

$$t_\phi = \frac{\Pi}{\left(n + \frac{\sigma \cdot B \cdot V_{\text{дем}}}{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}}} \right)}. \quad (8)$$

Как видно, зависимость (8) аналогична зависимости (2) с тем отличием, что вместо времени обработки τ в зависимость (8) входит параметр n . Следовательно, все выводы, сделанные при анализе зависимости (2), остаются справедливыми и для зависимости (8). Так, с увеличением количества проходов n фактическая глубина шлифования на проходе t_ϕ непрерывно уменьшается, уменьшая величину упругого перемещения, возникающего в технологической системе, и тем самым повышая точность обработки. При этом интенсивность уменьшения фактической глубины шлифования на проходе t_ϕ тем больше, чем меньше второе слагаемое, которое входит в знаменатель зависимости (8), т.е. чем меньше отношение $\sigma/K_{\text{рез}}$, параметры B , $V_{\text{дем}}$ и больше c и $V_{\text{кр}}$. Все это способствует повышению точности обработки.

Радиальная P_y составляющая силы резания с учетом зависимости (8) принимает вид:

$$P_y = \frac{c \cdot \Pi}{\left(1 + \frac{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot n}{\sigma \cdot B \cdot V_{\text{дем}}} \right)}. \quad (9)$$

С увеличением количества проходов n радиальная P_y составляющая силы резания уменьшается, что обеспечивает уменьшение величины упругого перемещения y , возникающего в технологической системе

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{\Pi}{\left(1 + \frac{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot n}{\sigma \cdot B \cdot V_{\text{дем}}} \right)}, \quad (10)$$

и соответственно повышение точности и качества обрабатываемой поверхности, производительности обработки.

Как и в зависимости (3), добиться повышения технологических показателей обработки в этом слу-

чае можно при условии $\frac{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot n}{\sigma \cdot B \cdot V_{\text{дем}}} > 1$. В противном случае выполняется условие $P_y \rightarrow c \cdot \Pi$ и реализуется упругая схема шлифования, а это не позволит повысить показатели точности и качества обрабатываемой поверхности, а соответственно и производительность обработки от применения схемы шлифования с начальным натягом в технологической системе.

Добиться выполнения условия $\frac{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot n}{\sigma \cdot B \cdot V_{\text{дем}}} > 1$

наиболее просто за счет увеличения отношения $K_{\text{рез}}/\sigma$ или уменьшения условного напряжения резания σ путем обеспечения высокой остроты режущего рельефа круга. Эффективным в этом направлении является применение прогрессивных методов правки и обеспечение работы круга в режиме самозатачивания с целью уменьшения интенсивности трения связи круга с обрабатываемым материалом.

Важным условием увеличения второго слагаемого в знаменателе зависимости (10) следует рассматривать увеличение приведенной жесткости технологической системы c , т.к. уменьшение параметров B , $V_{\text{дем}}$ и Π , по сути, ведет к снижению производительности обработки. Увеличение количества проходов круга при шлифовании n также приводит к снижению производительности обработки, поэтому целесообразно шлифование производить за несколько проходов круга, обеспечивая выполнение условия $\frac{K_{\text{рез}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot n}{\sigma \cdot B \cdot V_{\text{дем}}} > 1$ за счет увеличения отношения

$K_{\text{рез}}/\sigma$ и приведенной жесткости технологической системы c . Следовательно, несмотря на то, что второе слагаемое в знаменателе зависимости (10) включает достаточно большое количество параметров, изменяя которые можно добиться уменьшения этого слагаемого, на практике возможна реализация всего лишь двух условий (это увеличение $K_{\text{рез}}/\sigma$ и c), которые не приводят к снижению производительности обработки. Очевидно, наиболее просто реализуется первое условие за счет выбора оптимальных характеристик шлифовального круга.

Как отмечалось выше, схему шлифования с начальным натягом в технологической системе эффективно использовать при низкой жесткости технологической системы. В связи с этим она получила достаточно широкое применение на операциях шлифования деталей гидроаппаратуры, где требуется обеспечить высокие показатели точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей, в частности, при шлифовании отверстий диаметром 6 – 10 мм в кольцах из высокотвердых магнитных сплавов АН-КО-3А и ЮНДК-18 (HRC 62–63) [6]. Так, экспериментально установлено, что в связи с низкой жесткостью технологической системы (300 Н/мм) величина упругого перемещения при внутреннем шлифовании с

течением времени обработки непрерывно увеличивается (фактически по линейному закону). Это ограничивает возможности применения шлифования по жесткой схеме. Исходя из этого, целесообразно перейти к упругой схеме шлифования, создавая в технологической системе периодически натяги и осуществляя обработку, по сути, по схеме выхаживания. Например, установлено, что при начальном натяге 0,05 мм съём припуска величиной 0,8 мм может быть произведен за 16 этапов создания в технологической системе начальных натягов. Продолжительность каждого этапа составляет приблизительно 7,5 минут, а припуск величиной 0,8 мм удаляется за 120 минут, тогда как по действующей технологии внутреннего шлифования (по жесткой схеме) продолжительность обработки составляет 3,2 часа. Следовательно, переход от жесткой схемы шлифования к схеме шлифования с начальным натягом в технологической системе позволяет сократить время обработки более чем в 1,5 раза. Причем, данная схема шлифования была использована для решения задачи повышения производительности обработки при съеме значительных припусков, одновременно обеспечивая и повышение качества обработки за счет снижения силовой напряженности процесса шлифования.

Выводы. В работе аналитически описан характер изменения во времени силы резания, интенсивности съема материала и величины упругого перемещения, возникающего в технологической системе, при шлифовании с начальным натягом в технологической системе. Показано, что все эти параметры уменьшаются с течением времени обработки, обеспечивая требуемые (высокие) показатели точности и качества обрабатываемых поверхностей. Теоретически установлено, что по интенсивности изменения этих показателей во времени рассматриваемая схема шлифования превосходит упругую схему шлифования. Это указывает на эффективность ее применения на окончательном этапе операции шлифования при условии низкой жесткости технологической системы для обеспечения высоких показателей точности обработки. Приведены примеры эффективного практического использования данной схемы шлифования. Так, при обработке отверстий диаметром 6 – 10 мм в кольцах из высокотвердых магнитных сплавов АНКО-3А и ЮНДК-18 (HRC 62–63) переход от жесткой схемы

шлифования к схеме шлифования с начальным натягом в технологической системе позволило сократить время обработки более чем в 1,5 раза.

Список литературы: 1. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. "Механика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 2. Лурье Г. Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования / Г. Б. Лурье. – Л.: Машиностроение, 1984. – 103с. 3. Беззубенко Н. К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / Н. К. Беззубенко. – Харьков, 1995. – 56 с. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Т. 3. "Резание материалов лезвийными инструментами" – Одесса: ОНПУ, 2003. – 546 с. 5. Рябенков И. А. Оценка влияния интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом на эффективность процесса шлифования / И. А. Рябенков, Ф. В. Новиков // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 43 (1086). – С. 143–147. 6. Новиков Ф. В. Повышение эффективности обработки отверстий в деталях из высокотвердых магнитных сплавов / Ф. В. Новиков, И. А. Рябенков, В. И. Полянский // Инженерия поверхности и реновация изделий: материалы научн.-техн. конф., 03-07 мая 2013 г., г. Ялта. – Киев: АТМ України, 2013. – С. 205-207.

Bibliography (transliterated): 1. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologiy mashinostroeniya / pod obsh. red. F. V. Novikova i A. V. Yakimova. V 10 tomakh. – Vol. 1. "Mekhanika rezaniya materialov" – Odessa: ONPU, 2002. – 580 P. 2. Lurye G. B. Progressivnye metody kruglogo naruzhnogo shlifovaniya / G. B. Lurye. – Leningrad: Mashinostroenie, 1984. – 103 P. 3. Bezzubenko N. K. Povyshenie effektivnosti almaznogo shlifovaniya putem vvedeniya v zonu obrabotki dopolnitelnoy energii v forme elektricheskikh razryadov: avtoref. diP. na soiskanie nauthn. stepeni dokt. tekhn. nauk: spetP. 05.03.01 "Protsesty mekhanicheskoy obrabotki, stanki i instrumenty" / N. K. Bezzubenko. – Kharkov, 1995. – 56 P. 4. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologiy mashinostroeniya / pod obsh. red. F. V. Novikova i A. V. Yakimova. V 10 tomakh. – Vol. 3. "Rezanie materialov lezviynymi instrumentami" – Odessa: ONPU, 2003. – 546 P. 5. Ryabekov I. A. Otsenka vliyaniya intensivnosti treniya svyazki kruga s obrabatyvaemym materialom na effektivnost protsesssa shlifovaniya / I. A. Ryabekov, F. V. Novikov // Visnyk NTU "KhPI". Zbirnyk naukovykh pratP. – Kh.: NTU "KhPI", 2014. – No 43 (1086). – P. 143–147. 6. Novikov F. V. Povyshenie effektivnosti obrabotki otverstiy v detalyakh iz vysokotverdykh magnitnykh splavov / F. V. Novikov, I. A. Ryabekov, V. I. Polyanskiy // Ingenieriya poverkhnosti i renovatsiya izdeliy: materialy nauthn.-tekhn. konf., 03-07 maya 2013 g., g. Yalta. – Kiev: ATM Ukrainy, 2013. – P. 205-207.

Поступила (received) 10.10.2015

Новиков Федор Васильевич – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный экономический университет имени С. Кузнецца, и.о. заведующего кафедрой "Естественные науки и технологии"; тел.: (067) 6890342; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Novikov Fedor Vasilyovich – Doktor of Technical Sciences (Ph. D.), Full Professor, Харьковский национальный экономический университет имени С. Кузнецца, и.о. заведующего кафедрой "Естественные науки и технологии"; тел.: (067) 6890342; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Рябенков Игорь Александрович – кандидат технических наук, ведущий инженер-технолог, Государственное предприятие Харьковский машиностроительный завод "ФЭД"; тел. (057) 7596631; e-mail: rigor0212@gmail.com

Ryabekov Igor Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Lead Engineer, State Enterprise Kharkiv Machine-Building Plant "FED"; тел. (057) 7596631; e-mail: rigor0212@gmail.com