

В.Г. ШКУРУПИЙ, канд. техн. наук, ХНЭУ, Харьков;

Ф.В. НОВИКОВ, докт. техн. наук, ХНЭУ, Харьков;

А.Г. КРЮК, канд. техн. наук, ХНЭУ, Харьков

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТКИ ПРИ АБРАЗИВНОМ ПОЛИРОВАНИИ

Доказано, что при фиксированном радиальном усилии удельное давление в зоне обработки при абразивном полировании уменьшается вследствие увеличения относительной опорной длины микропрофиля обрабатываемой исходной поверхности. В результате уменьшается фактическая скорость радиальной подачи, что соответствует схеме выхаживания при шлифовании. Этим показано, что схема абразивного полирования с фиксированным радиальным усилием является наиболее оптимальной с точки зрения обеспечения условий уменьшения шероховатости при обработке поверхностей со значительной исходной шероховатостью, образованной на предшествующих операциях.

Ключевые слова: абразивное полирование, шероховатость поверхности, радиальное усилие, скорость радиальной подачи, схема выхаживания.

Введение. Технологическое обеспечение качества обработки деталей машин требует применения прогрессивных методов финишной обработки, одним из которых является метод абразивного полирования. Несмотря на значительный опыт, накопленный в области абразивного полирования, технологические возможности этого метода обработки используются не в полной мере, особенно в плане достижения высоких показателей шероховатости поверхности. Поэтому актуальны дальнейшие исследования технологических возможностей абразивного полирования.

Анализ последних достижений и литературы. В работах [1 – 3] раскрыта физическая сущность и даны практические рекомендации по эффективному применению абразивного полирования. Приведены результаты многочисленных экспериментальных исследований шероховатости поверхности при полировании, которые широко используются в производственных условиях. Однако, приведенные в этих работах эмпирические зависимости параметров шероховатости поверхности справедливы для частных условий обработки и не позволяют получить обобщенные решения, охватывающие широкие диапазоны изменения технологических параметров. Поэтому важной задачей является разра-

ботка математической модели определения параметров шероховатости поверхности при абразивном полировании и выявление на ее основе новых условий высококачественной обработки.

Цель работы, постановка проблемы. Целью работы является теоретическое обоснование путей уменьшения шероховатости поверхности при абразивном полировании на основе ее аналитического описания и анализа.

Материалы исследования. Абразивное полирование предназначено для уменьшения исходной шероховатости поверхности на обрабатываемой детали. Для этого инструмент, на рабочей поверхности которого расположены абразивные зерна, совершает вращательное и радиальное движения со скоростью радиальной подачи S_{rad} . Поскольку производится, по сути, обработка микронеровностей исходной поверхности образца, описываемой вероятностной функцией $\Phi(y)$ [4] (рис. 1,а), то фактическая площадь контакта инструмента с образцом $F(y) = B \cdot H \cdot \Phi(y)$ в начальный момент процесса значительно меньше номинальной площади $F = B \cdot H$ (для абсолютно гладкой поверхности). Здесь B и H – ширина и длина обрабатываемого образца. Исходя из такого представления процесса абразивного полирования, при фиксированной скорости радиальной подачи S_{rad} образца радиальная составляющая силы резания P_y в начальный момент обработки будет наименьшей и по мере съема микронеровностей будет увеличиваться. По такому же закону будет изменяться и производительность обработки Q (рис. 1,а). Шероховатость поверхности в конечный момент обработки будет зависеть от скорости радиальной подачи: чем она больше, тем больше будет и шероховатость поверхности. Поэтому с точки зрения уменьшения шероховатости поверхности, очевидно, скорость радиальной подачи S_{rad} целесообразно уменьшать. Однако это приведет к снижению производительности Q , что неэффективно. Таким образом, имеет место противоречие, связан-

ное с противоположным влиянием скорости радиальной подачи S_{rad} на шероховатость и производительность обработки Q .

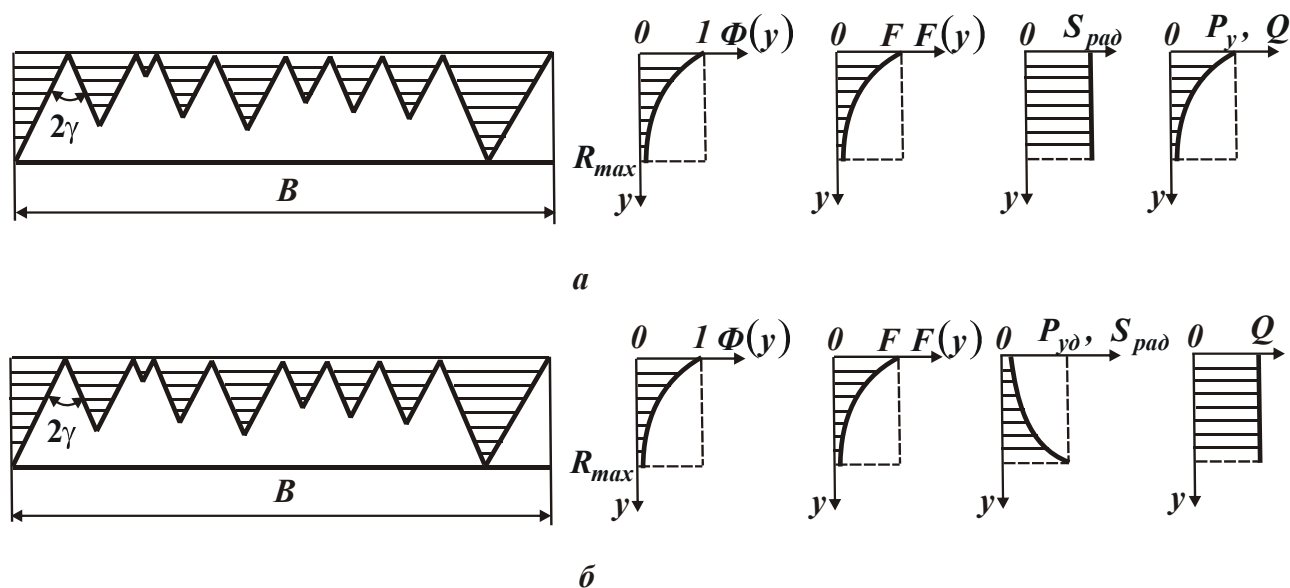


Рис. 1 – Расчетные схемы параметров абразивного полирования при фиксированной скорости радиальной подачи S_{rad} (а) и фиксированным радиальным усилием P_y (б)

Чтобы исключить данное противоречие, на практике предложено процесс абразивного полирования осуществлять с фиксированным радиальным усилием P_y (рис. 1,б). Это позволяет в начальный момент обработки съём металла в виде значительных микронеровностей на обрабатываемой поверхности производить с увеличенной скоростью радиальной подачи S_{rad} , т.к. фактическая площадь контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью образца $F(y) = B \cdot H \cdot \Phi(y)$ в этом случае небольшая. По мере съема микронеровностей и перехода к съему сплошного металла скорость радиальной подачи S_{rad} будет уменьшаться, а это приведет к уменьшению шероховатости обработанной поверхности. По закону изменения скорости радиальной подачи S_{rad} будет изменяться и удельное давление $P_{y\partial} = P_y / F(y)$ (рис. 1,б).

Таким образом показано, что за счет осуществления съема металла с переменной во времени скоростью радиальной подачи обеспечивается повыше-

ние производительности в начальный момент обработки и уменьшение шероховатости поверхности на конечном этапе обработки. Фактически реализуется оптимальная схема финишной абразивной обработки, соответствующая схеме выхаживания при шлифовании, когда съём металла на окончательном этапе обработки осуществляется без радиальной подачи за счет упруго-восстанавливающей силы, возникающей в технологической системе. В этом случае фактическая скорость радиальной подачи уменьшается во времени от исходного значения практически до нуля, что обеспечивает достижение наилучших показателей шероховатости и точности обрабатываемых поверхностей. По сути, то же происходит и в процессе абразивного полирования с фиксированным радиальным усилием P_y .

В работе [5] показано, что производительность обработки при круглом врезном шлифовании на этапе выхаживания описывается зависимостью:

$$Q = Q_0 \cdot e^{-\frac{c \cdot V_{кр} \cdot K_{ш} \cdot \tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma}}, \quad (1)$$

где Q_0 – начальная производительность обработки (при $\tau = 0$), м³/с;

c – жесткость технологической системы, Н/м;

$V_{кр}$ – скорость круга, м/с;

$K_{ш} = P_z / P_y$ – коэффициент шлифования;

P_z, P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н;

τ – текущее время обработки, с;

$D_{дет}, l_{дет}$ – диаметр и длина цилиндрической детали, м;

σ – условное напряжение резания, Н/м².

Как видно, с течением времени обработки τ производительность обработки Q уменьшается по экспоненциальному закону, причем тем интенсивнее,

чем меньше параметры $D_{дет}$, $l_{дет}$, σ и больше c , $V_{кр}$, $K_{ш} = P_z / P_y$. Естественно, уменьшение производительности обработки приводит к снижению шероховатости погрешности и погрешности обработки, т.е. повышению точности обрабатываемой поверхности. Для аналитического описания параметров процесса абразивного полирования, по аналогии с процессом шлифования [5], следует представить радиальное усилие P_y (равное радиальной составляющей силы резания при шлифовании) в виде: $P_y = P_z / K_{рез}$, где $K_{рез} = K_{ш}$ – коэффициент резания. С учетом известного соотношения [5] $P_z = \sigma \cdot S_{мгн}$ имеем $P_y = \frac{\sigma \cdot S_{мгн}}{K_{рез}}$, где $S_{мгн} = Q / V_{инстр}$ – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми работающими абразивными зёрнами, m^2 . Параметр $S_{мгн}$ можно установить на основе известной зависимости для определения производительности обработки Q при шлифовании [5]: $Q = S_{мгн} \cdot V_{кр}$, где $V_{кр}$ – скорость круга, м/с. При абразивном полировании вместо скорости круга $V_{кр}$ необходимо рассматривать скорость перемещения инструмента $V_{инстр}$. Тогда

$$P_y = \frac{\sigma \cdot Q}{K_{рез} \cdot V_{инстр}}. \quad (2)$$

При абразивном полировании прямоугольного образца с фиксированной скоростью радиальной подачи производительность обработки Q можно выразить зависимостью $Q = F \cdot S_{рад}$, где $F = B \cdot H$ – площадь контакта обрабатываемого образца с инструментом, m^2 . Тогда зависимость (2) примет вид:

$$P_y = \frac{\sigma \cdot F \cdot S_{рад}}{K_{рез} \cdot V_{инстр}}. \quad (3)$$

Соответственно удельное давление $P_{уд} = P_y / F$ определится:

$$P_{yд} = \frac{\sigma \cdot S_{рад}}{K_{рез} \cdot V_{инстр}}. \quad (4)$$

При заданном радиальном усилии P_y , скорость $S_{рад}$ выразится:

$$S_{рад} = \frac{K_{рез} \cdot P_y \cdot V_{инстр}}{\sigma \cdot F} = \frac{K_{рез} \cdot P_{yд} \cdot V_{инстр}}{\sigma}. \quad (5)$$

Как видно, увеличить $S_{рад}$ и соответственно производительность обработки Q можно уменьшением $\sigma / K_{рез}$, F и увеличением P_y и $V_{инстр}$ или же увеличением удельного давления $P_{yд} = P_y / F$. Уменьшить $\sigma / K_{рез}$ можно повышением режущей способности абразивного инструмента, в особой мере за счет уменьшения интенсивности трения его с обрабатываемым материалом.

Из зависимости (5) следует, что при обработке образца с переменной (увеличивающейся во времени) площадью контакта образца с инструментом F , скорость радиальной подачи $S_{рад}$ непрерывно увеличивается. Это согласуется с практикой финишной абразивной обработки [1]. На заключительном этапе обработки при абразивном полировании фактическая площадь контакта обрабатываемого образца с инструментом F увеличивается до номинальной площади, соответствующей обработке абсолютно гладкой поверхности. Исходя из зависимости (5), это приводит к уменьшению скорости радиальной подачи $S_{рад}$ и, очевидно, к уменьшению шероховатости обрабатываемой поверхности.

Необходимо отметить, что при абразивном полировании образца с фиксированным радиальным усилием $P_y = const$ как с постоянной, так и с переменной (увеличивающейся во времени) площадью контакта образца с инструментом F , производительность обработки Q не зависит от $S_{рад}$, а определяется зависимостью (2), которая после преобразований принимает вид:

$$Q = \frac{K_{рез} \cdot P_y \cdot V_{инстр}}{\sigma}. \quad (6)$$

Как видно, производительность обработки Q тем больше, чем меньше $\sigma / K_{рез}$ и больше $P_y, V_{инстр}$. В зависимости от характера изменения отношения $\sigma / K_{рез}$ с течением времени обработки τ (главным образом от изменения условного напряжения резания σ) производительность обработки Q может увеличиваться, уменьшаться или оставаться постоянной. Очевидно, для того чтобы она оставалась постоянной необходимо применять более износостойкие абразивные материалы, характеризующиеся высокой режущей способностью.

Результаты исследований. Определим время абразивного полирования τ с фиксированным радиальным усилием $P_y = const$ при условии, что фактическая площадь контакта обрабатываемого образца с инструментом F по координате y изменяется по закону:

$$F(y) = H \cdot B(y) = H \cdot tg\beta \cdot y, \quad (7)$$

где $B(y) = tg\beta \cdot y$;

β – угол наклона функции $B(y)$.

В данном случае для удобства расчетов направление координаты y (рис. 2,а) изменили на противоположное (рис. 2,б).

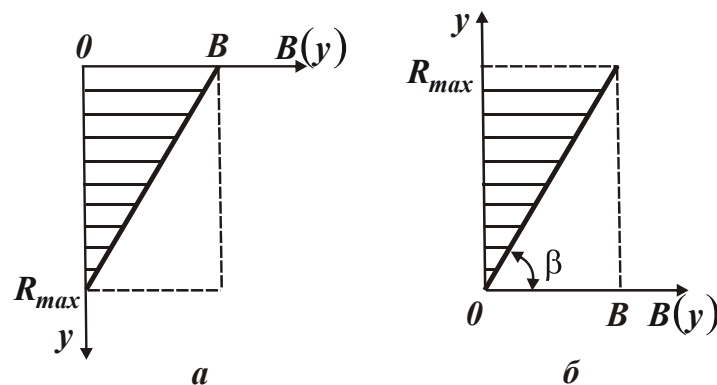


Рис. 2 – Вид функции $B(y)$

Зависимость (5) в этом случае примет вид:

$$S_{рад} = \frac{K_{рез} \cdot P_y \cdot V_{инстр}}{\sigma \cdot H \cdot tg\beta \cdot y}. \quad (8)$$

Как видно, с увеличением координаты y скорость радиальной подачи $S_{рад}$ непрерывно уменьшается. Время обработки τ при абразивном полировании с переменной $S_{рад}$ можно представить в виде суммы значений времени, затрачиваемого на съём единицы толщины обрабатываемого материала Δy :

$$\tau = \sum_{i=1}^r \frac{\Delta y}{S_{рад_i}}, \quad (9)$$

где $S_{рад_i}$ – скорость радиальной подачи в различные моменты времени, м/с.

Подставляя зависимость (8) в зависимость (9), имеем:

$$\tau = \sum_{i=1}^r \frac{\Delta y \cdot \sigma \cdot H \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot y}{K_{рез} \cdot P_y \cdot V_{инстр}}. \quad (10)$$

Переход от суммирования к интегрированию по координате y ($\Delta y = dy$):

$$\tau = \int_0^y \frac{\sigma \cdot H \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot y}{K_{рез} \cdot P_y \cdot V_{инстр}} \cdot dy = \frac{\sigma \cdot H \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot y^2}{2 \cdot K_{рез} \cdot P_y \cdot V_{инстр}}. \quad (11)$$

Из зависимости (11) следует, что уменьшить время обработки τ можно уменьшением $\sigma / K_{рез}$, $\operatorname{tg} \beta$, y и увеличением P_y и $V_{инстр}$. На время обработки τ наибольшее влияние оказывает параметр y , который в данном случае равен максимальной высоте микронеровностей исходной обрабатываемой поверхности R_{max} , т.е. $y = R_{max}$. Разрешая (11) относительно координаты y , имеем:

$$y = \sqrt{\frac{2 \cdot K_{рез} \cdot P_y \cdot V_{инстр} \cdot \tau}{\sigma \cdot H \cdot \operatorname{tg} \beta}}. \quad (12)$$

Подставляя зависимость (12) в зависимость (8), получено:

$$S_{рад} = \sqrt{\frac{K_{рез} \cdot P_y \cdot V_{инстр}}{2 \cdot \sigma \cdot H \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \tau}}. \quad (13)$$

Как видно, с течением времени обработки τ скорость радиальной подачи $S_{рад}$ уменьшается. При этом производительность обработки $Q = F(y) \cdot S_{рад}$ с учетом зависимостей (7) и (13) равна:

$$Q = \frac{K_{рез} \cdot P_y \cdot V_{инстр}}{\sigma} \quad (14)$$

В итоге пришли к зависимости (6). Этим показано, что производительность обработки Q не зависит от скорости радиальной подачи $S_{рад}$, а определяется отношением $\sigma / K_{рез}$, радиальным усилием P_y и скоростью перемещения инструмента $V_{инстр}$, т.е. как и в случае абразивного полирования с постоянной площадью контакта образца с инструментом F . На рис. 3 показан характер изменения параметров Q , $S_{рад}$ и y с течением времени обработки τ в соответствии с зависимостями (14), (13) и (12).

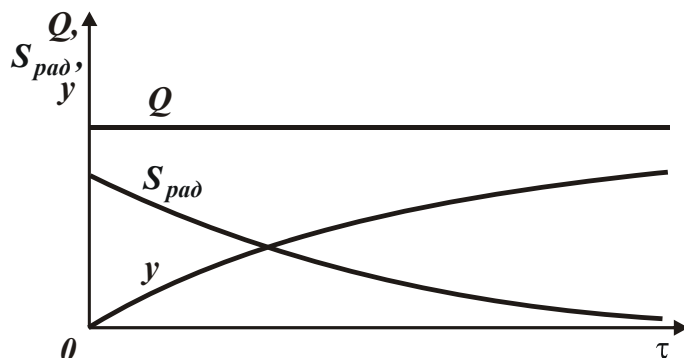


Рис. 3 – Характер изменения параметров Q , $S_{рад}$ и y с течением времени обработки τ

Для других законов изменения фактической площади контакта обрабатываемого образца с инструментом F по координате y зависимость (11) будет другой, однако характер изменения времени обработки τ от координаты y останется таким же, т.к. время обработки τ будет увеличиваться по мере перемещения инструмента вдоль координаты y . При этом производительность обработки Q будет оставаться постоянной.

Выводы. Доказано, что при фиксированном радиальном усилии удельное давление в зоне обработки при абразивном полировании уменьшается вслед-

ствие увеличения относительной опорной длины микропрофиля обрабатываемой исходной поверхности. В результате уменьшается фактическая скорость радиальной подачи, что, по сути, соответствует схеме выхаживания при шлифовании, предназначенной для уменьшения шероховатости поверхности и снижения упругих перемещений, возникающих в технологической системе в процессе шлифования, т.е. для повышения точности обработки. Этим показано, что схема абразивного полирования с фиксированным радиальным усилием является наиболее оптимальной с точки зрения обеспечения условий уменьшения шероховатости при обработке поверхностей со значительной исходной шероховатостью, образованной на предшествующих операциях.

Список литературы: 1. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э. В. Рыжов, А. А. Сагарда, В. Б. Ильицкий, И. Х. Чеповецкий. – К.: Наукова думка, 1979. – 244 с. 2. Кедров С. М. Средства повышения производительности доводки металлов / С. М. Кедров // Станки и инструмент, 1987. – №6. – С. 10-13. 3. Ваксер Д. Б. Пути повышения производительности абразивного инструмента при шлифовании / Д. Б. Ваксер. – М.: Машиностроение, 1964. – 123с. 4. Новиков Ф.В. Математична модель визначення шорсткості поверхні при абразивній обробці / Ф.В. Новиков, В.В. Нежебовський, В.Г. Шкурупий // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 5 (979). – С. 199-210. 5. Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков и др. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.

Bibliography (transliterated): 1. Kachestvo poverkhnosti prialmazno-abrazivnoy obrabotke / E.V. Ryzhov, A.A. Sagarda, V.B. Ilitskiy, I.K. Chepovetskiy. – K.: Naukova dumka, 1979. – 244 s. 2. Kedrov S.M. Sredstva povysheniya proizvoditelnosti dovodki metallov / S.M. Kedrov // Stanki i instrument, 1987. – №6. – S. 10-13. 3. Vakser D.B. Puti povysheniya proizvoditelnosti abrazivnogo instrumenta pri shlifovanii / D.B. Vakser. – M.: Mashinostroenie, 1964. – 123 s. 4. Novikov F.V. Matematychna model vyznachennya shorstkosti poverkhni pry abrazivniy obrobtsi / F.V. Novikov, V.V. Nezhebovskiy, V.G. Shkurupiy // Visnyk NTU «KhPI». Zbirnyk naukovykh prats. Seriya: Matematichne modeliuvannya v tekhnitsi ta tekhnologiyakh. – Kh.: NTU «KhPI». – 2013. – № 5 (979). – S. 199-210. 5. Teoretycheskie osnovy rezaniyz i shlifovaniya materialov: ucheb. posobie / A.V. Yakimov, F.V. Novikov, G.V. Novikov i dr. – Odessa: OGPU, 1999. – 450 s.