

УДК 621.923

А.В. Байков, канд. техн. наук

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

Тел. +38(062)3010805; E-mail: [tm@mech.dgtu.donetsk.ua](mailto:tm@mech.dgtu.donetsk.ua)

## НЕРАВНОМЕРНОСТЬ СЪЕМА МАТЕРИАЛА ПРИ МНОГОПРОХОДНОМ ШЛИФОВАНИИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

*Приведены результаты исследования неравномерности съема материала при плоском торцовом шлифовании деталей из природного камня при многопроходной обработке изделий на автоматических линиях, выявлены доминирующие факторы технологической системы, определяющие неравномерность съема, предложены пути повышения геометрической точности изделий.*

**Ключевые слова:** торцовое шлифование, величина съема материала, коэффициент заполнения алмазонаосного слоя, траектория перемещения инструмента.

### Введение

Решением задачи формообразования поверхностей деталей, в том числе из хрупких неметаллических материалов (ХНМ), занималось и занимается большое количество исследователей [1-5]. Трудность решения задачи формообразования заключается в сложности технологической системы, влиянии большого количества факторов на процесс обработки, существовании различных теорий разрушения ХНМ. Что касается деталей из ХНМ, то задача определения геометрических и кинематических параметров процесса обработки, обеспечивающих требуемые параметры формы изделия, были поставлены и решались преимущественно в области производства деталей оптики, инфракрасной и лазерной техники, оптоэлектроники. При обработке плоскостей, значительно превышающих размеры шлифовального инструмента, например обработка облицовочных плит, станин прецизионных станков и поверочных плит из природного камня, решение задачи формирования плоской поверхности имеет свои особенности.

Особенностью обработки крупногабаритных изделий из природного камня является значительное превышение габаритов обрабатываемой поверхности над габаритами инструмента. Это определяет специфику кинематических схем обработки данных изделий, их отличие от кинематики обработки оптических деталей. При обработке указанных изделий заготовка или неподвижна, или совершает поступательное движение, а инструмент вращается вокруг своей оси и совершает поступательное движение.

Сложность технологической системы обработки деталей из ХНМ приводит к тому, что изменение какого-либо фактора приводит к перестроению технологической системы и формированию новых закономерностей процесса обработки. Поэтому для решения вопросов обеспечения геометрической точности поверхности при обработке крупногабаритных изделий из природного камня, особенно на этапе тонкого шлифования, где применяется эластичный шлифовальный инструмент, необходимо решить следующие задачи:

- определить закономерность изменения величины съема материала при торцовом шлифовании поперек полосы обработки;
- определить влияние траектории перемещения шлифовального инструмента на неравномерность съема материала по поверхности изделия.

**Основное содержание и результаты работы.**

Величина съема в общем случае является функцией технологических режимов обработки, характеристик режущего инструмента и физико-механических свойств обрабатываемого материала.

На основании физико-механического подхода к проблеме формообразования поверхностей [1] съем на каждой элементарной площадке определяется зависимостью:

$$\frac{dz}{dt} = C_m p k \bar{V}, \quad (1)$$

где  $z$  - линейный съем в данной точке поверхности детали;

$C_m$  - постоянная, характеризующая конкретные условия обработки (зернистость и твердость инструмента, свойства обрабатываемого материала и т.д.), МПа<sup>-1</sup>;

$p$  - удельное давление в зоне резания, МПа;

$k$  - коэффициент заполнения инструмента, [1,3];

$\bar{V}$  - средняя скорость относительного движения инструмента и детали, м/с;

$t$  - время, с.

Рассматривая относительное движение элементарных площадок заготовки по поверхности шлифовального круга, и полагая удельное давление одинаковым по всей поверхности зоны контакта (для шлифования эластичным инструментом), величина съема материала на каждой элементарной площадке будет определяться величиной среднего значения скорости взаимодействия поверхности шлифовального с элементарной площадкой заготовки. Подставив среднее значение скорости относительного движения точки обрабатываемой плоскости по поверхности инструмента в выражение (1) и проведя преобразования, получим значение линейного съема материала в точке, расположенной на расстоянии  $m$  от траектории движения центра инструмента:

$$Z = C_m p k \frac{4\pi}{1000} \int_0^{t_1} \sqrt{R^2 - 2St\sqrt{R^2 - m^2} + (St)^2} dt, \quad (2)$$

Используя выражение (2), можно рассчитать величину съема материала в каждой элементарной полосе обработки, равной диаметру ширины круга и определить неравномерность съема при данных условиях обработки.

Для анализа влияния коэффициента заполнения алмазоносного слоя на характер изменения величины съема материала в сечении, перпендикулярном направлению подачи инструмента, были проведены расчеты по формуле (2) для шлифовальных кругов с различной конструкцией рабочего слоя: расположением алмазоносного слоя по логарифмической спирали и в виде радиально расположенных лучей. Рассматривались также круги со сплошным алмазоносным слоем, так как на данном инструменте наиболее наглядно прослеживаются закономерности влияния конструкции рабочего слоя на съем материала. Значение коэффициента заполнения для инструмента с алмазоносным слоем в виде логарифмической спирали и в виде радиально расположенных лучей принято по данным [1] и при подстановке в (2) выражено через текущий радиус расположения элементарной площадки материала относительно центра шлифовального круга. Характер изменения величины съема материала поперек полосы обработки для кругов с различным характером заполнения алмазоносного слоя приведен на рисунке 1.

Полученные кривые позволяют характеризовать как производительность обработки (интегральный съем под всей кривой), так и так и неравномерность съема материала, которую можно определить как отношение максимального и минимального значений съема в полосе обработки. Следовательно, минимальное значение съема будет в

центре шлифовального круга. Таким образом, для шлифовального круга со сплошным алмазонасным слоем суммарный съем составляет (в условных единицах)  $Z_{\Sigma}=3296$ , неравномерность съема  $\delta_Z=1,367$ , в виде логарифмической спирали  $Z_{\Sigma}=856$ , и  $\delta_Z=1,553$ , в виде радиальных лучей  $Z_{\Sigma}=542$ ,  $\delta_Z=1,441$ .

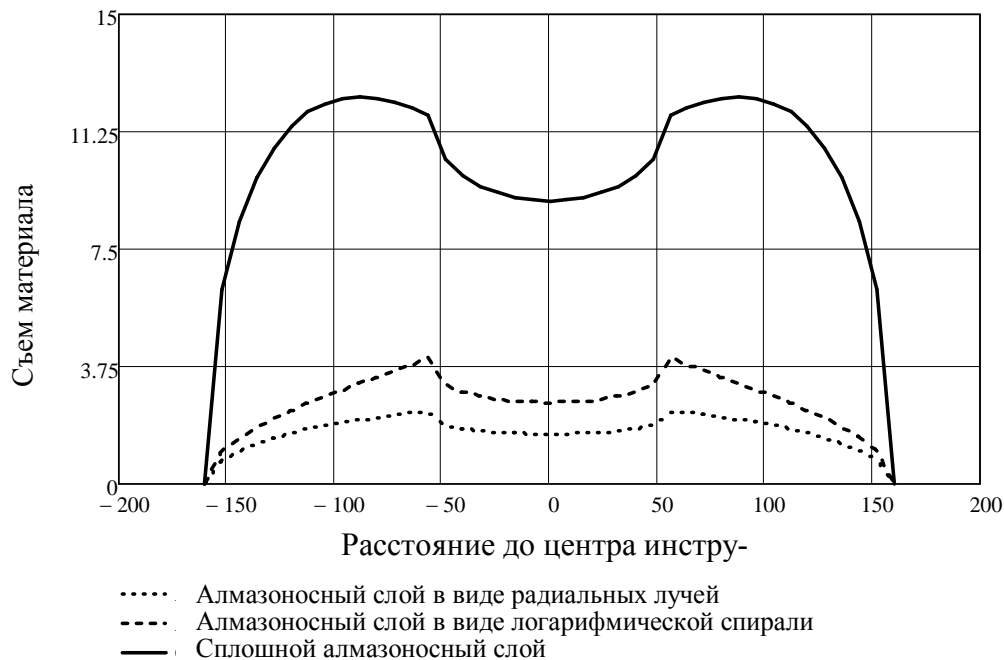


Рис. 1. Зависимость величины съема материала от расстояния до центра инструмента в направлении, перпендикулярном подаче

Аналитическое представление изменения поверхности детали в процессе обработки принято представлять в матричной форме:

$$A_1 = A_0 - B,$$

где  $A_1, A_0$  - матрицы порядка  $m \times n$ , отражающие текущие аппликаты, отсчитываемые от базовой поверхности детали в момент времени соответственно  $t_1$  и  $t_2$  ( $m \times n$  - число элементарных площадок размером  $\partial x \times \partial y$  на поверхности детали);

$B$  - матрица порядка  $m \times n$ , определяющая величину съема материала по каждой элементарной площадке поверхности детали за время  $\Delta t = t_2 - t_1$ .

В качестве оценки неравномерности съема рассматривается разница между максимальным и минимальным значением съема на элементарной площадке. Эта величина является результатом неравномерности съема материала, определяемой геометрией торцового инструмента и характером траекторий перемещения инструмента по поверхности заготовки. Для определения величины съема в каждой точке (элементарной площадке) заготовки необходимо координаты точек съема, получаемые при каждом проходе инструмента, привести из системы координат, связанной с центром шлифовального круга, к системе координат, связанной с заготовкой.

При торцовом шлифовании плоских поверхностей матрицы преобразования определяются кинематической схемой перемещения шлифовального круга по поверхно-

сти заготовки. Для случая обработки заготовки по схеме «зигзаг» (рис. 2), наиболее распространенной при обработке изделий на конвейерных станках и автоматических линиях, величина съема и время, определяющее положение начала координат шлифовального круга, будут определяться следующими уравнениями (при прямом перемещении шлифовального круга,  $k$  - нечетное):

$$\begin{cases} z_k = f(x_k) = z; \\ x_k = [x - S_{np}(k-1)t_p - S_{np}t_k] / \cos \varphi_g. \end{cases} \quad (3)$$

$$t_k = \frac{[x - S_{np}(k-1)t_p] \sin \varphi_g + y \cos \varphi_g}{S_{np} \sin \varphi_g + S_{non} \cos \varphi_g}.$$

где  $\varphi_g$  – угол между осями координат обрабатываемой детали и шлифовального круга, град.;

$x_k$  – координата радиуса-вектора начального репера на участке  $k$ ;

$S_{np}$  – скорость перемещения заготовки (продольная подача), м/с;

$S_{non}$  – скорость перемещения оси инструмента (поперечная подача), м/с;

$t_k$  – текущее время; время перемещения оси инструмента по участку  $k$

$t_p$  – время реверса направления поперечной подачи шлифовального круга.

Угол поворота системы координат определяется из условия перекрытия полос обработки шлифовальным кругом:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{S_{np} t}{S_{non} t} = \frac{D - \Delta}{2 \cdot B}, \quad (4)$$

где  $D$  – диаметр шлифовального круга, мм;

$\Delta$  – коэффициент перекрытия зон обработки, мм;

$B$  – ширина обрабатываемой заготовки, мм.

При реверсивном перемещении шлифовального круга ( $k$  - четное) расчетные уравнения определяются аналогично.

Величина съема материала в каждой точке заготовки определяется путем наложения величин съема при каждом проходе инструмента:

$$z_0 = z_1 + z_2 + \dots + z_n. \quad (5)$$

Выражения (3) и (5) позволяют определить величину съема материала в любой точке детали при многократном прохождении через нее шлифовального круга. Разница между максимальной величиной съема в какой-либо точке и

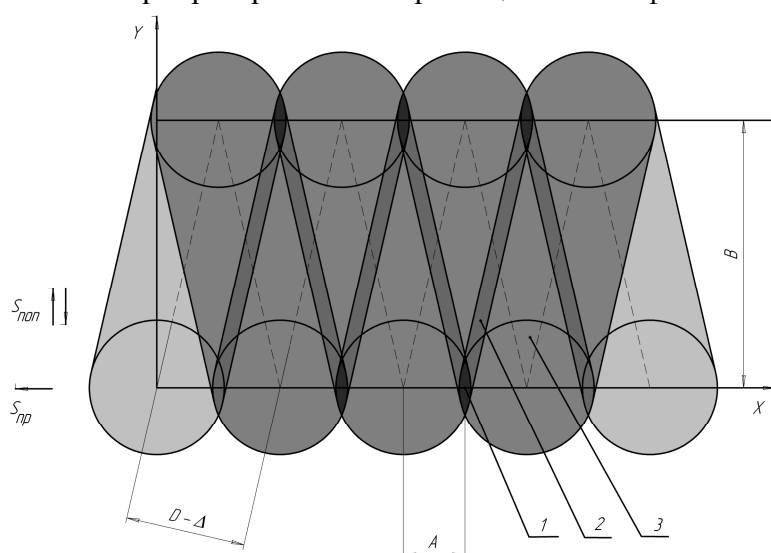


Рис. 2. Наложение полос обработки при движении шлифовального круга по схеме «зигзаг»

минимальной величиной в какой-то другой точке будет характеризовать неравномерность съема, определяемую данными кинематическими параметрами при данной схеме обработки[6]. При перемещении инструмента по траектории «зигзаг», кинематические параметры, которые определяют неравномерность величины съема материала – значения

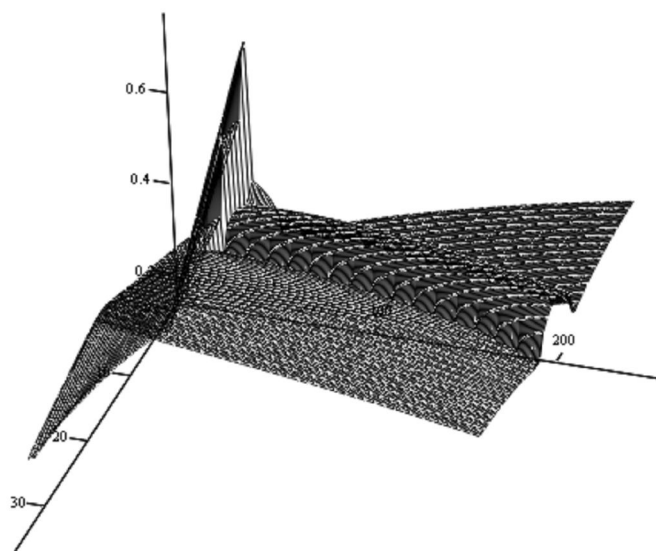


Рис. 3. Неравномерность съема материала при обработке по схеме «зигзаг»

продольной и поперечной подач. Величина соотношения между значениями данных подач, согласно выражению (4), определяет степень перекрытия полос обработки. Основной причиной появления неравномерности съема при движении шлифовального круга по схеме «зигзаг» является различное количество проходов инструмента в различных зонах заготовки. Например, по точкам зоны 1 (рис. 2) шлифовальный круг проходит 4 раза, по точкам зоны 2 - 3 раза, по остальным (зона 3) - 2 раза. Кроме того, каждая точка заготовки находится на различном расстоянии от центра перемещения инструмента, что также влияет на неравномерность съема материала.

Согласно изложенной методике исследовалось влияние геометрии рабочей поверхности торцового шлифовального круга (алмазосносный слой сплошной, в виде радиальных лучей, в виде логарифмической спирали) и степени перекрытия параллельных полос обработки (которая определяется соотношением продольной и поперечной подачи при обработке по схеме «зигзаг»), на неравномерность съема материала и производительность обработки. Неравномерность съема материала оценивалась коэффициентом неравномерности « $\psi$ » - отношением максимальной точечной величины съема к минимальной.

Анализ изменения неравномерности съема материала в зависимости от перекрытия параллельных полос обработки показывает, что для рассматриваемых конструкций шлифовальных кругов присутствует общая тенденция снижения неравномерности с увеличением коэффициента перекрытия. Характерно, что если при величинах перекрытия  $\Delta=(0,1 \div 0,5)$  коэффициент неравномерности различается в  $1,5 \div 2$  раза для кругов различной геометрии рабочей поверхности, то при  $\Delta=0,9$  значения  $\psi$  для кругов различной геометрии практически равны между собой. Кроме того, для всех конструкций шлифовальных кругов максимальные значения съема наблюдаются вблизи края заготовки, где через точки поверхности заготовки шлифовальный круг проходит наибольшее количество раз (рис. 3).

#### Выводы.

При торцовом шлифовании поверхностей, габариты которых превышают диаметр шлифовального круга, величина съема материала поперек полосы обработки является функцией от расстояния до центра инструмента для кругов различной конструкции рабочего слоя. Характер изменения величины съема вдоль радиуса инструмента определяется распределением коэффициента заполнения алмазосносного слоя.

Расчеты неравномерности съема припуска для предложенной схемы обработки позволили определить рациональную степень перекрытия полос обработки, обеспечивающую неравномерность величины съема не более чем 1,4 раза. Для инструмента со сплошным алмазонасным слоем зона перекрытия равна  $\Delta=0,025D$ , где  $D$  - диаметр инструмента, для алмазонасного слоя в виде логарифмической спирали  $\Delta=0,175D$ , для алмазонасного слоя в виде радиальных лучей  $\Delta=0,125D$ .

#### Список литературы:

1. Рогов В. В. Финишная алмазно-абразивная обработка неметаллических деталей / В. В. Рогов. – К. : Наук. думка, 1985. – 264 с.
2. Филатов А. Ю. Особенности формирования макро- и микрорельефа плоских поверхностей деталей из неметаллических материалов при алмазном шлифовании / А. Ю. Филатов, В. И. Сидорко, Ю. Д. Филатов // Сверхтвердые материалы. – 2007. – № 6. – С. 48-57.
3. Сидорко В. И. Научные основы процессов финишной алмазно-абразивной обработки природного и синтетического камня : дис... доктора техн. наук : 05.03.01 / Сидорко Владимир Игоревич. – К., 2006. – 396 с.
4. Филатов Ю.Д. Моделирование процесса прецизионного формообразования плоских поверхностей / Ю.Д. Филатов, О.Я. Юрчишин // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування. – 2010. – № 58. – С. 241–244.
5. Горобец И. А. Повышение качества шлифования заготовок из природного камня / И. А. Горобец, Н. В. Голубов, И. А. Чвала // Научный Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – 2011. – № 1 – С. 29-37.
6. Байков А.В. Влияние конструкции рабочей поверхности торцовых шлифовальных кругов на показатели обработки крупногабаритных деталей / Байков А.В., Чернышев Е.А., Михайлов А.Н., Феник Л.Н. // Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов XVI международной научно-технической конференции в г. Севастополе 14-19 сентября 2009 г. В 4-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2009. Т. 1.– С.64-68.

Надійшла до редакції 10.01.2014

**А.В. Байков**

#### НЕРІВНОМІРНІСТЬ ЗНІМАННЯ МАТЕРІАЛУ ПРИ БАГАТОПРОХІДНОМУ ШЛІФУВАННІ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ

*Наведено результати дослідження нерівномірності знімання матеріалу при плоскому торцевому шліфуванні деталей із природного каменю при багатопрохідній обробці виробів на автоматичних лініях, виявлені домінуючі фактори технологічної системи, що визначають нерівномірність знімання, запропоновані шляхи підвищення геометричної точності виробів.*

**Ключові слова:** торцеве шліфування, величина знімання матеріалу, коефіцієнт заповнення алмазонасного шару, траєкторія переміщення інструмента.

**A.V. Baykov**

#### UNEVEN MATERIAL REMOVAL IN MULTIPASS GRINDING OF FLAT SURFACES

*The article provides the results of research of uneven material removal during flat face grinding of natural stone. We identified the dominant factors of the technological system which determine uneven removal and suggested the ways to improve geometric accuracy of products.*

**Keywords:** mechanical grinding, amount of material removal, filling factor of the diamond layer, tool path.