

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ УПРОЧНЯЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ КРУГОМ С ОРИЕНТИРОВАННЫМИ ЗЕРНАМИ В ФОРМЕ ГЕКСАЭДРА ПРИ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ШЛИФОВАНИИ (МЭШ)

М. В. Нерода¹, Б. Г. Холодарь²

¹ К. т. н., доцент, исследователь в области упрочнения и восстановления деталей машин, декан машиностроительного факультета Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь

² К. т. н., доцент, исследователь в области теоретической механики, научный сотрудник научно-исследовательской части Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь

Реферат

В статье представлены результаты моделирования процесса абразивного резания упрочняющего покрытия кругом с ориентированными зернами в форме гексаэдра при магнитно-электрическом шлифовании (МЭШ).

Ключевые слова: композиционные покрытия, магнитно-электрическое шлифование, моделирование, абразивный круг, зерна.

SIMULATION OF THE ABRASIVE CUTTING PROCESS OF A STRENGTHENING COATING WITH ORIENTED GRAINS IN THE SHAPE OF A HEXAHEDRAL DURING MAGNETIC-ELECTRIC GRINDING (MEG)

M. V. Niaroda, B. G. Holodar

Abstract

The article presents the results of modeling the process of abrasive cutting of a hardening coating in a circle with oriented grains in the form of a hexahedron during magnetic-electric grinding (MEG).

Keywords: composite coatings, magnetic-electric grinding, modeling, abrasive wheel, grains.

Введение

В современном машиностроении применяются методы восстановления деталей машин, такие как наплавка проволокой, напыление газотермическими методами. Упрочненные или восстановленные самофлюсующимися сплавами на основе никеля, хрома, поверхности деталей характеризуются высокими значениями шероховатости (Ra 100–120 мкм) поверхности и твердости (58 – 62 HRC), толщиной нанесенного слоя от 0,5 до 2,5 мм. Эти факторы затрудняют последующую механическую обработку. Применение метода магнитно-электрического шлифования для обработки таких покрытий является перспективным, так как позволяет сконцентрировать в зоне обработки дополнительные источники энергии, а именно, магнитной, электрической и механической и повысить производительность обработки [1, 2].

В процессе обработки в зоне резания МЭШ происходят сложные комплексные физические процессы, которые влияют на качество поверхности покрытия его физико-механические свойства [3].

Для управления этими процессами требуется глубокое изучение физики процесса МЭШ упрочняющих покрытий (далее покрытий), механического резания зернами токопроводящего абразивного круга, формирования ими микрорельефа в сочетании с электроэрозийными и магнитными процессами в зоне обработки.

Постановка задачи

В связи с вышеизложенным в статье представлены результаты моделирования процесса резания при МЭШ ориентированными зернами абразивного круга, выявлены кинематические особенности движения зерна и воздействия его на обрабатываемую поверхность покрытия.

При изготовлении шлифовальных кругов абразивные частицы некоторым образом распределяются в объеме материала связки (основы круга). Частицы имеют размеры, ограниченные определенным диапазоном (зернистостью круга), и концентрацию (объемную или весовую). В связи с неоднородностью распределения частиц по объему и размерам при определении технологических параметров процесса шлифования требуется использование усредненного подхода, основывающегося на среднестатистических характеристиках инструмента. При этом взаимозависимость различных сторон процесса обработки (подача и скорость процесса резания, температура разогрева материалов, изменение их физико-механических свойств и т. п.) не всегда позволяет однозначно спрогнозировать результат при изменении какой-либо одной характеристики системы.

Изучение процессов, происходящих в зоне обработки МЭШ на рабочих режимах, разработка оптимального технологического процесса и нового оборудования требуют построения соответствующих

математических моделей, которые позволят более содержательно оценить роль отдельных параметров и характеристик абразивного круга и режимов обработки с точки зрения их влияния на качество обрабатываемого покрытия, производительность обработки.

Поэтому моделирование процессов, происходящих в зоне МЭШ, в виде программной реализации является задачей актуальной и важной.

Условия моделирования процесса резания зернами абразива при МЭШ твердых покрытий.

Равномерное по объему шлифовального круга распределение частиц абразива является по ряду причин оптимальным, но недостижимым фактически и практически. Наиболее равномерное распределение частиц в объеме соответствует кубической или гексагональной объемно-центрированным решеткам. При этом гексагональная обеспечивает более плотную упаковку частиц. Учитывая, что зерна абразива имеют угловую форму, выберем их в виде двух соединенных основаниями пентаэдров, высота которых равна радиусу сферы, а диагональ квадратного основания расположена в плоскости слоя. Центры получившихся таким образом гексаэдров совпадают с центрами условных сфер, а в пространстве между ними теперь можно расположить зерна соседнего слоя, что для зерен в форме куба позволит довести объемную концентрацию абразива до 91%. Уровень концентрации может регулироваться увеличением расстояния между слоями и изменением размеров гексаэдров (рис. 1).

При моделировании процесса МЭШ форма и размеры зерен абразивного круга приняты одинаковыми, диагонали основания выбраны равными 0,8 диаметра условной сферы при одинаковой ориентации частиц слоя в пространстве. При этом частицы со всех сторон окружены компаундом токопроводящей основы круга. Объемная концентрация абразива составляет 58%. Форма частиц и их расположение в центре и на периферии у торца круга показаны на рисунке 1 и рисунке 2.

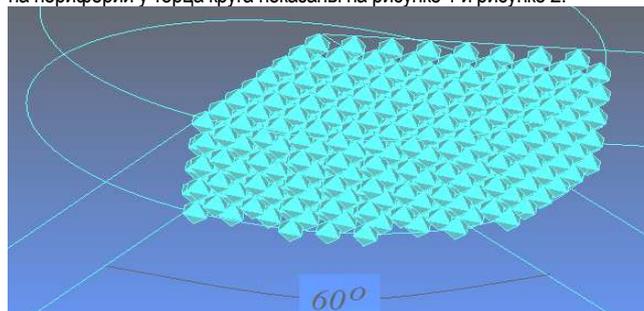


Рисунок 1 – Центральная зона круга

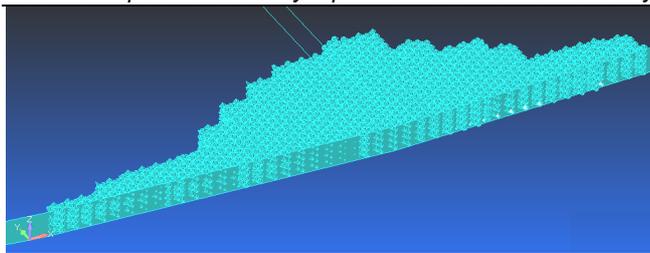


Рисунок 2 – Торцевая зона круга

Диаметр абразивного круга принят равным $D=250$ мм, большая диагональ гексаэдров (диаметр условной сферы) $d=250$ мк, число зерен вдоль радиуса круга равно $N_{zer}=500$. Структура в расположении зерен в слое повторяется через 60 градусов, а биссектриса каждого такого сектора также является осью симметрии. Если зерна расположить вдоль наружной окружности круга, то их число будет равным $\pi/3 \cdot N_{zer} > 500$, и так как диагональ гексаэдров меньше диаметра условной сферы, то для каждого зерна имеем возможность (за счет небольшого поворота на $(\pi/6)/(\pi N_{zer}/3) = 1/(2N) \approx 0.06$ градуса относительно соседнего) сориентировать его вдоль радиуса круга, проходящего через центр зерна.

При выбранной структуре круга на цилиндрической поверхности с радиусом $R=D/2$ в рассматриваемом слое будет находиться 6 зерен, выступающих за величину высоты зерна, равную радиусу условной сферы. Выступ других зерен, участвующих в процессе резания, будет меньше. Кроме того, принимаем условие, что для удержания наиболее выступающих зерен токопроводящая основа абразивного круга выступает за центр наиболее удаленных шести зерен на расстояние, равное одной трети высоты пентаэдра. При этом режущая часть зерна над основой абразивного круга выступает на величину $2/3 \cdot H_{zer}$, где $H_{zer}=R_{сф}=d_{сф}/2=125$ мк, а радиус наружной торцевой поверхности (основы абразивного круга) составляет $R_{сф}=125.042$ мм.

В связи с тем, что центры зерен расположены на прямых, лежащих под углом 60 градусов к границе сектора, то за торцевую поверхность круга зерна выступают на разную высоту. Для определения положения центров зерен введем в рассмотрение два индекса: j – определяет положение центров зерен, лежащих на границе сектора, k – определяет положение центров зерен на наклонных прямых внутри секторов. При этом $0 \leq j \leq j_N$, $0 \leq k \leq k_N$, где $j_N = \text{int}(D/2/H_{zer}) + 1$, $k_N = \text{int}(D/2 \cos 30^\circ / H_{zer}) + 1$. Тогда расстояние от центра зерна до оси круга можно определить как

$$R_{jk} = d_{сф} \cdot (j^2 + (k-1)^2 - j \cdot (k-1))^{1/2} \quad (1)$$

и далее определить индексы всех зерен, которые выходят за размер торцевой поверхности и могут участвовать в процессе резания. Кроме того, определяется также угловое расположение центра зерна относительно радиуса, проходящего через центры зерен, лежащих на границе сектора (индексы $k=0$).

Самое удаленное от оси круга зерно, лежащее на границе сектора с индексами ($j=j_N$, $k=0$), примем за нулевое. Нулевое зерно (всего таких в круге, как было отмечено выше, шесть) наиболее глубоко проникает в обрабатываемый материал покрытия. Поверхность покрытия считаем гладким. Угол между высотой зерна и его ребром равен $\gamma = \arctg(0.8) \approx 38.66^\circ$, при этом двугранный угол на режущей кромке $2\psi \approx 104.03^\circ$. Модель режущего зерна абразивного круга показана на рис. 3.

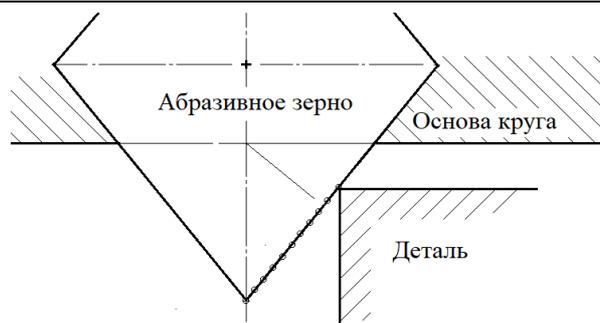


Рисунок 3 – Абразивное зерно и обрабатываемая деталь

Для определенности и получения числовых результатов применения разрабатываемой модели зададим глубину снимаемого слоя равной $T=50$ мк, скорость продольной подачи примем равной $V_p=1000$ мм/мин, частота вращения абразивного круга равной $n=2000$ об/мин. Направление подачи и направление движения точек оси режущего зерна совпадают (встречная подача). Процесс резания начинается нулевым зерном с торца заготовки. На кромке (ребре зерна) возьмем несколько равномерно расположенных точек, считая, что первоначальный контакт с заготовкой будет иметь точка, наиболее удаленная от вершины зерна. Зазор между этой точкой и основой круга получается равным 33.33 мк. Ввиду малости размеров зерна относительно размеров круга будем считать, что контур основы круга во всех своих точках перпендикулярен высоте зерна (рис. 3).

Определение траекторий движения кромок зерен абразивного круга при МЭШ

Поместим начало неподвижной системы координат в вершине нулевого зерна (рис. 3). В этой системе осей уравнения движения вершины запишутся в виде:

$$X = V_p t + R_V \cdot \sin(\varphi); \quad Y = R_V (1 - \cos(\varphi)), \quad (2)$$

где t – время движения;

R_V – расстояние от вершины зерна до центра круга;

$\varphi = \pi n / 30 \cdot t$ – угол поворота круга.

Соответственно для точек расположенных на ребре зерна уравнения движения запишутся как:

$$X_i = V_p t + R_i \cdot \sin(Ug_i + \varphi), \quad (3)$$

$$Y_i = R_V - R_i \cdot \cos(Ug_i + \varphi), \quad (4)$$

где индекс i принимает значения $i=0, 1, 2, \dots, i_k=10$; R_i – расстояние от i -ой точки зерна до центра круга, угол Ug_i соответствует углу отклонения радиуса i -ой точки от вертикальной оси Y при исходном неподвижном положении нулевого зерна.

Процесс внедрения зерна абразивного круга при МЭШ в материал покрытия, в зависимости от положения оси зерна, можно разбить на три стадии (см рис. 4). Первая стадия – от начала движения до момента контакта вершины зерна с покрытием ($0 \leq t \leq t_1$), вторая – до момента пересечения оси зерна с угловой точкой торца ($t_1 \leq t \leq t_2$), третья – до момента выхода вершины зерна из покрытия ($t_2 \leq t \leq t_3$).

Построенные по принятым числовым данным траектории точек в пределах обрабатываемой детали показаны на рисунке 5, при этом масштаб построения по осям X и Y существенно различен. Длина следа по оси X составляет $X_V \approx 3.5$ мм, соответствующее время дви-

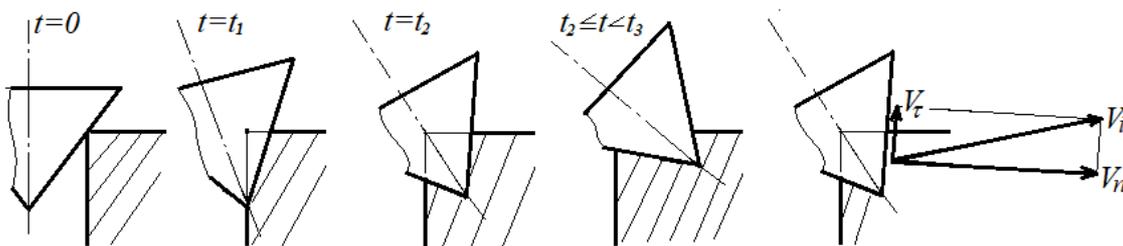


Рисунок 4 – Схема движения зерна при внедрении в материал покрытия

жения $1.35 \cdot 10^{-4}$ сек. На рисунке видно, что контакт точек ребра зерна с покрытием начинается в разные моменты времени, соответствующие подходу точек к торцу покрытия. Вычисления проведены с постоянным шагом по времени Δt , пройденный точкой путь в связи с малостью шага вычислялся по формуле

$$S(i) = \sum [(X_r - X_{pi})^2 + (Y_r - Y_{pi})^2], \quad (5)$$

где X_{pi} , Y_{pi} – координаты точки на предыдущем шаге. Наиболее удаленная точка ($i = i_k$) сразу же выходит из контакта с деталью. Путь S_V , пройденный вершиной зерна в детали ($t \geq t_1$), незначительно превышает длину следа $S_V > X_V \approx 3.5$ мм.

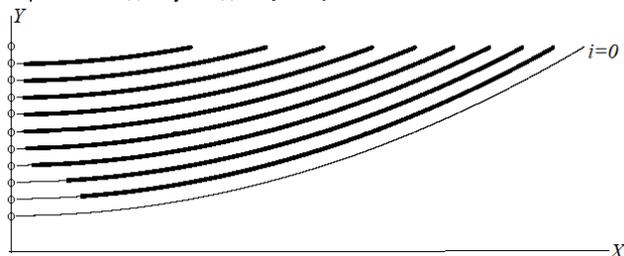


Рисунок 5 – Траектории точек ребра зерна в снимаемом слое материала покрытия

Рассматривая на каждой из стадий процесс пересечения зерна с поверхностью заготовки (с учетом поворота оси зерна во времени), можно определить объем материала покрытия $V_{\text{из}}$, удаляемого из тела заготовки за определенный момент времени Δt суммы $V_{\text{из}}(t) = \sum_j(\Delta_j V)$.

Соответствующая кривая $V_{\text{из}}(t)$ показана на рисунке 6.

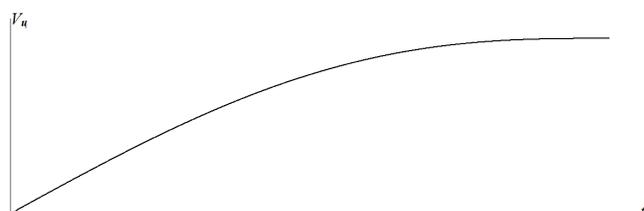


Рисунок 6 – Нарастание объема выбираемого материала

Определение формы и объема материала покрытия, снимаемого единичным зерном при МЭШ

Определив траектории движения точек режущей кромки зерна, можно определить форму стружки снимаемой зерном, а следовательно, возможности расчета электрического сопротивления и мощности прерываемой поверхности покрытия за счет протекания по ней электрического тока.

Решение данной задачи зависит от многих дополнительных факторов. Во-первых, в процессе внедрения абразивных зерен в материал покрытия в каждой ее точке будет иметь место изменяющаяся во времени по заранее неизвестному закону температура, от которой непосредственно зависят свойства подвергающегося механической обработке материала покрытия. Деформации как самого материала покрытия в приграничной к зерну зоне, так и деформации материала стружки по своему уровню относятся к так называемым “большим деформациям”, требующим также еще и использования их связи с “истинными” напряжениями. Теоретические решения задач, близких по содержанию к рассматриваемой, в такой постановке отсутствуют. Кроме того, само построение соответствующих зависимостей “напряжения-деформации” $\sigma(\epsilon)$ в подобного рода постановке требует дополнительного рассмотрения, так как в литературе такие данные отсутствуют. Во-вторых, напряженно-деформированное состояние (НДС) материала покрытия является сложным и его в целом нельзя отнести ни к одному из более простых классических случаев плоско-напряженного (ПНС) или плоско-деформированного (ПД) состояний.

Если вектор скорости точки ребра зерна V_i разложить на составляющие (рис. 4), одна из которых направлена перпендикулярно

ребру (V_n), а вторая – вдоль ребра (V_t), то понятно, что в связи с близостью свободной поверхности покрытия составляющая V_t вызовет движение части материала в сторону этой поверхности и будет способствовать появлению на ней “валика” из выдавленного материала. Поскольку само зерно при этом продолжает движение, то при определенных режимах обработки весьма вероятно и образование трещин перед его режущей кромкой. Оба этих факта оказывают влияние на величину возникающих сил сопротивления движению, но в данных исследованиях они не учитываются.

Составляющей V_n соответствует движение материала покрытия по граням зерна перпендикулярно его режущей кромке. Для нас это движение представляет основной интерес, так как оно определяет образование стружки и ее форму (протяженность и толщину), а с формой стружки непосредственно связан вопрос о прохождении электрического тока между основной кругом и заготовкой, что является необходимым и важным элементом процесса магнитно-электрического шлифования. Предположим, что в процессе движения зерна материал заготовки, расположенный между выделенными соседними точками режущей кромки, находится в одинаковом напряженно-деформированном состоянии по ширине своей полосы. Поскольку этот материал находится внутри двух соседних слоев (не считая самого верхнего слоя $i=i_k$), то с достаточно высоким приближением можно считать, что слой будет находиться в плоско-деформированном состоянии при смещении материала у кромки ребра перпендикулярно ребру зерна. При таком подходе для определения характеристик движения материала в каждом выделенном слое можно воспользоваться известным решением задачи о внедрении бесконечного клина в полупространство [4]. Материал считается жесткопластическим. Схема задачи показана на рисунке 7.

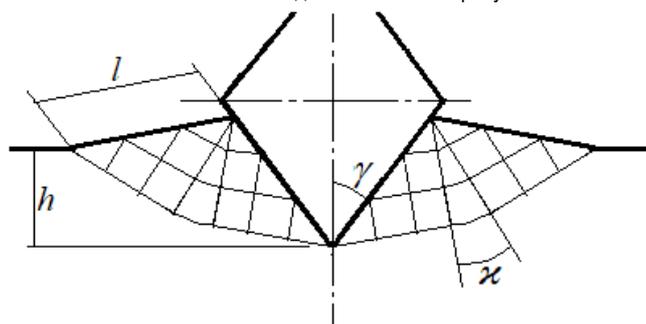


Рисунок 7 – Внедрение зерна в полупространство

Участки поля (треугольные и центрированные) представляют собой поля линий скольжения, в которых напряжение меняется линейно по координате или является равномерным (поля простого напряженного состояния), поэтому представляется возможным получение решения в аналитическом виде.

Характерной особенностью принятой схемы является сохранение геометрического подобия поля напряжений с ростом глубины h внедрения зерна. Так как углы χ и $\gamma - \chi$ в этой схеме сохраняют свои значения, то толщина выдавливаемого материала l нарастает линейно пропорционально глубине h .

Ширина зоны выдавливания, равная длине зоны контакта зерна с полупространством, определяется через глубину внедрения h как:

$$l = h / (\cos(\gamma) - \sin(\gamma - \chi)). \quad (6)$$

Ясно, что решение по схеме рисунка 7 будет справедливо только до момента, пока выдавливаемый материал покрытия сохраняет контакт с поверхностью граней зерна. Возможное поле линий скольжения можно представить в виде, показанном на рисунке 8.

В связи с необходимостью расчета длины стружки и площади ее сечения, без учета условия воздействия на зерно нагрузок, определить эти параметры можно, исходя из условия равенства объемов несжимаемого материала покрытия, выдавливаемого зерном, и материала, уходящего от ребра зерна, используя приведенные на рисунке 9 схемы. Вид поля дает представление и о толщине стружки, возникающей возле каждой точки кромки зерна на конкретном этапе движения (схемы а, б, в).

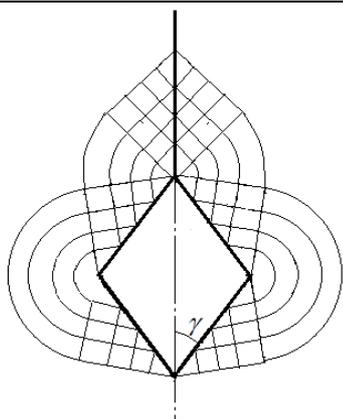


Рисунок 8 – Поля линий скольжения при внедрении зерна в материал покрытия (при условии возрастания глубины внедрения зерна)

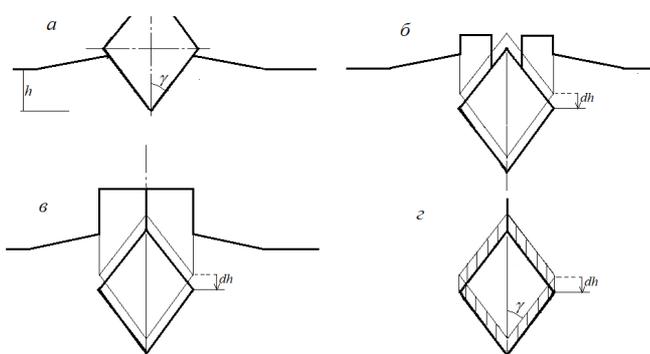


Рисунок 9 – Схемы выдавливания материала при погружении ромба

Зона контакта выдавливаемого материала с зерном в зависимости от положения точки на кромке зерна имеет вид, приведенный на рисунке 10. При $\text{tg}\gamma=0.8$ углы $\psi \approx 52.01^\circ$, $\vartheta \approx 15.7^\circ$.

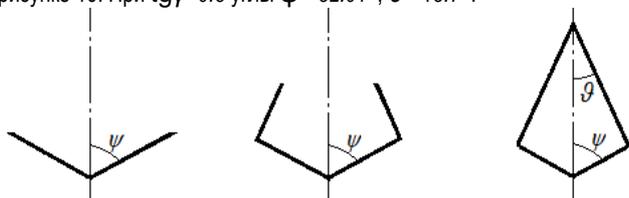


Рисунок 10 – Формы зон контакта материала с зерном для i -точек

На основе принятых выше условий разработана программа на языке FORTRAN для расчета и моделирования процесса МЭШ.

На рисунке 11 показан вид царапины, оставленной зерном на поверхности покрытия. На траекториях точек (рис. 5) толстыми линиями указаны зоны, при которых выдавливаемый из покрытия материал находится в контакте с основой абразивного круга. Время контакта t от соприкосновения материала с токопроводящей связкой абразивного круга и до момента выхода i -ой точки из зацепления показано на рисунке 12.

Заключение

В результате теоретических расчетов и компьютерного моделирования процесса абразивного резания при МЭШ установлены:

1. Траектории движения точек абразивного зерна, а также математические модели позволяющие определить время контакта зерна с материалом покрытия.
2. Определена зона контакта выдавливаемого материала с зерном в зависимости от положения точки на кромке зерна.

3. Определен характер течения материала при движении абразивного зерна в покрытии, позволяющий найти электрическое сопротивление стружки и протекающий через нее ток, которые необходимы для определения тепловых параметров процесса магнитно-электрического шлифования.

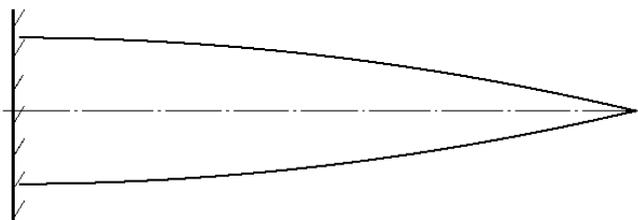


Рисунок 11 – Форма царапины (ширина и глубина) оставляемая единичным зерном на поверхности покрытия

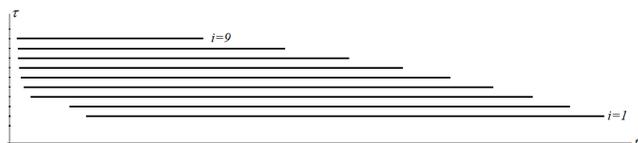


Рисунок 12 – Длительность контакта материала детали (по точкам ребра зерна) с токопроводящей связкой абразивного круга

Список цитированных источников

1. Спиридонов, Н. В. Особенности магнитно-электрического шлифования газотермических покрытий / М. В. Нерода, Н. В. Спиридонов // Вестник БНТУ. – 2007. – № 4. – С. 31–34.
2. Спиридонов, Н. В. Способ магнитно-электрического шлифования газотермических покрытий / Н. В. Спиридонов, М. В. Нерода // Становление современной науки : материалы 1 Международной научно-практической конференции. – Днепропетровск : Наука и образование, 2006. – Т. 1. – С. 68–71.
3. Нерода, М. В. Физическая сущность процесса магнитно-электрического шлифования (МЭШ) защитных газотермических покрытий / М. В. Нерода // Молодежь производству : сборник статей международной научно-технической конференции. – Витебск : УО ВГТУ, 2006. – С. 208–210.
4. Качанов, Л. М. Основы теории пластичности / Л. М. Качанов. – М. : Наука, 1969. – 420 с.

References

1. Spiridonov, N. V. Osobnosti magnitno-elektricheskogo shlifovaniya gazotermicheskikh pokrytij / M. V. Neroda, N. V. Spiridonov // Vestnik BNTU. – 2007. – № 4. – S. 31–34.
2. Spiridonov, N. V. Sposob magnitno-elektricheskogo shlifovaniya gazotermicheskikh pokrytij / N. V. Spiridonov, M. V. Neroda // Stanovlenie sovremennoj nauki : materialy 1 Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – Dnepropetrovsk : Nauka i obrazovanie, 2006. – T. 1. – S. 68–71.
3. Neroda, M. V. Fizicheskaya sushchnost' processa magnitno-elektricheskogo shlifovaniya (MESH) zashchitnykh gazotermicheskikh pokrytij / M. V. Neroda // Molodezh' proizvodstvu : sbornik statej mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. – Vitebsk : UO VGTU, 2006. – S. 208–210.
4. Kachanov, L. M. Osnovy teorii plastichnosti / L. M. Kachanov. – M. : Nauka, 1969. – 420 s.

Материал поступил в редакцию 18.10.2020