

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Нерода, М. В. Исследование механических и пластических свойств стали марки 10КП с покрытиями, сформированными методом ионно-плазменного азотирования. / М. В. Нерода [и др.] // Вест. Брест. гос. техн. ун-та. – 2019. – № 4 : Машиностроение. – С. 2–4.
2. Лахтин, Ю. М. Химико – термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. – М. : Металлургия, 1985. – 256 с.
3. Голубев, В. С. Использование лазерных технологий упрочнения в сельскохозяйственном машиностроении / В. С. Голубев [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. / Гос. науч. учреждение "Физико-технич. ин-т НАН Беларуси" ; редколлегия: А. В. Белый (главный редактор) [и др.]. – Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. – Минск, 2018. – Кн. 2. – С. 58–65.
4. Девойно, О. Г. Эффективность использования лазерной закалки для увеличения прочности зубчатых колес / О. Г. Девойно [и др.] // Лучевые технологии в сварке и обработке материалов : сб. трудов восьмой междунар. конф., Киев, 11–15 сентября 2017 г. / Международная Ассоциация «Сварка». – Киев, 2017. – С. 83–86.
5. Андрияхин, В. М. Расчет поверхностной закалки железоуглеродистых сплавов с помощью технологических СО<sub>2</sub>-лазеров непрерывного действия / В. М. Андрияхин, В. С. Майоров, В. П. Якунин // Поверхность: Физика, химия, механика. – 1983. – № 6. – С. 140–147.
6. Веремейчик, А. И. Плазменные технологии как одни из основных технологий повышения эксплуатационных свойств металлоизделий / А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, В. М. Хвиевич // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки : междунар. сб. науч. тр. / Бел. гос. ун-т транспорта. – Гомель, 2008. – Вып. 2. – С. 6–12.
7. Чудина, О. В. Механизмы упрочнения железа при лазерном легировании и азотировании / О. В. Чудина, Л. Г. Петрова // Металловедение и термическая обработка металлов – 2002. – № 4. – С. 21–26.
8. Братухин, А. В. Повышение износостойкости инструментальных сталей при изготовлении авиационного крепежа с использованием лазерного термического упрочнения : дис. кандидата техн. наук : 05.16.01 / А. В. Братухин – Нижний Новгород, 2020. – 160 л.
9. Тескер, Е. И. Современные методы повышения несущей способности высоконагруженных зубчатых передач трансмиссий и приводов / Е. И. Тескер, С. Е. Тескер // Теория и практика зубчатых передач – 2014 : Междунар. симпозиум. – Ижевск, 2014 г. – С. 316–323.
10. Семенцев, А. М. Повышение эффективности лазерной обработки деталей из железоуглеродистых сплавов, основанное на установленном механизме массопереноса легирующих элементов в зоне лазерного воздействия: дис. кандидата техн. наук / А. М. Семенцев – Брянск: Изд-во БГТУ, 2008. – 235 л.
11. Великих, В. С. Влияние лазерной закалки на механические свойства стали / В. С. Великих, В. К. Гончаренко, А. В. Романенко – М. : Металлургия, 1986. – 215 с.

УДК 621.92

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЗЕРЕН ЭЛЕКТРОШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

*Нерода М.В., Холодарь Б.Г.*

Брестский государственный технический университет; г. Брест, Республика Беларусь

Одним из перспективных процессов механической обработки является шлифование электропроводящим абразивным кругом, при котором в зону резания

вносится дополнительная тепловая энергия, выделяющаяся в стружке при замыкании цепи между материалом детали и основой круга.

Неоднородность частиц абразива по размерам и форме, неравномерность их распределения по объему круга вызывают целесообразность разработки математических моделей, позволяющих оценить роль отдельных характеристик инструмента и режимов резания с точки зрения их влияния на качество и производительность обработки. Ниже представлены результаты такого моделирования для круга, состоящего из параллельных слоев равномерно распределенных в них зерен, выполненных в виде правильных гексаэдров – двух соединенных основаниями пентаэдров, у которых диагональ квадратного основания расположена в плоскости слоя [1].

Каждый слой в своей плоскости представляет собой шесть одинаковых прилегающих друг к другу секторов по  $60^\circ$  каждый, причем их структура является симметричной относительно высоты сектора. Зерна, лежащие на границе секторов, будем называть нулевыми, а зерна, выступающие за основу круга и расположенные между нулевыми, – промежуточными. Их вершины выступают за основу круга меньше, чем вершины нулевых зерен. Между заготовкой и основой круга имеет место зазор, величина которого может варьироваться. Толщина снимаемого поверхностного слоя заготовки принята равной  $T = 50$  мк. Сечение зерна в плоскости круга показано на рисунке 1. На любом из зерен длина участка ребра от вершины зерна до поверхности обрабатываемой детали равномерно поделена точками ( $0 \leq i \leq 10$ ) на десять слоев. Угол между высотой зерна и его ребром равен  $\gamma = \arctg(0.8) \approx 38.66^\circ$ , при этом двугранный угол на режущей кромке составляет  $2\psi \approx 104.03^\circ$ . Скорость вращения круга обозначена далее через  $n$  (об/мин), скорость встречной продольной подачи через  $V_p$  (мм/мин).

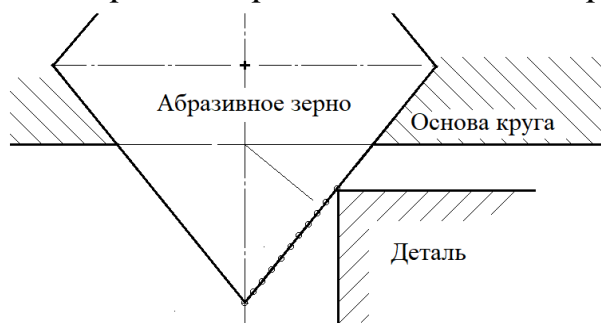


Рисунок 1 – Абразивное зерно и обрабатываемая деталь

В процессе торцевой обработки заготовки шлифовальным кругом имеют место различные варианты взаимодействия абразивных частиц с материалом заготовки, в частности, такими случаями являются внедрение зерна с торца заготовки и внедрение внутрь следа от предыдущих зерен. В первом случае материал заготовки движется параллельными струйками от режущего ребра “назад” к боковым ребрам зерна, а во втором – от боковых ребер “вперед” в сторону режущей кромки, образуя то, что и принято называть стружкой.

К решению первой задачи применена схема проникновения абсолютно-жесткого клина в идеально-пластическое тело. В зависимости от глубины проникновения ребра в деталь последовательность внедрения зерна в торец складывается из нескольких этапов (рисунок 2).

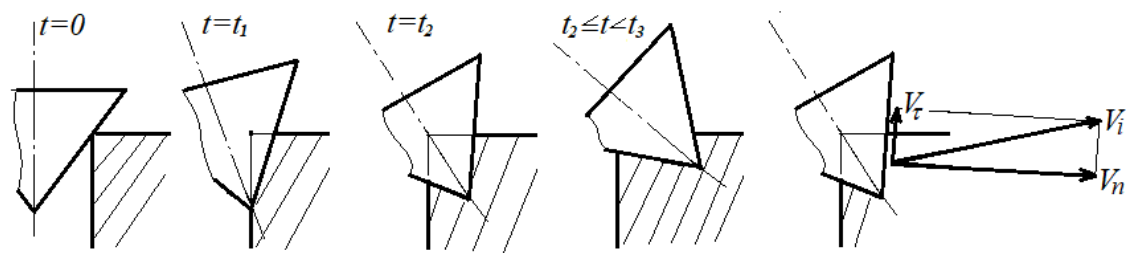


Рисунок 2 – Схема движения зерна при внедрении в материал заготовки

Для промежутка  $0 \leq t \leq t_1$  использовано решение, приведенное в [2], для последующих моментов времени построены более сложные схемы взаимодействия зерна и заготовки [1] и найдены соответствующие геометрические параметры этих схем в зависимости от глубины проникновения. Во всех случаях определена геометрия выдавливаемого из заготовки материала, найдено время начала и конца его контакта с основой круга в предположении, что материал течет одинаково в объеме струек, заключенных между соседними выделенными точками на ребре зерна. Между двумя последовательными моментами времени форма новообразованного участка струйки принималась в виде усеченной пирамидки, размеры которой непрерывно изменяются. После контакта струйки с основой круга ее дальнейшее внедрение в круг становится невозможным из-за ее излома или расплавления материала. Отсюда следует, что длина возникшего электропроводящего столбика остается далее неизменной вплоть до момента выхода точек режущего ребра из материала заготовки.

Использованная схемой дает возможность определить электрическое сопротивление токопроводника, мощности и выделяющейся энергии. При этом сопротивление отдельной струйки определялось по правилам последовательного соединения участков токопроводника с учетом переменности их сечения, общее сопротивление выдавливаемого материала – по правилам параллельного соединения. Характер изменения сопротивления  $R$  во времени для внедряющегося нулевого зерна показан на рисунке 2.

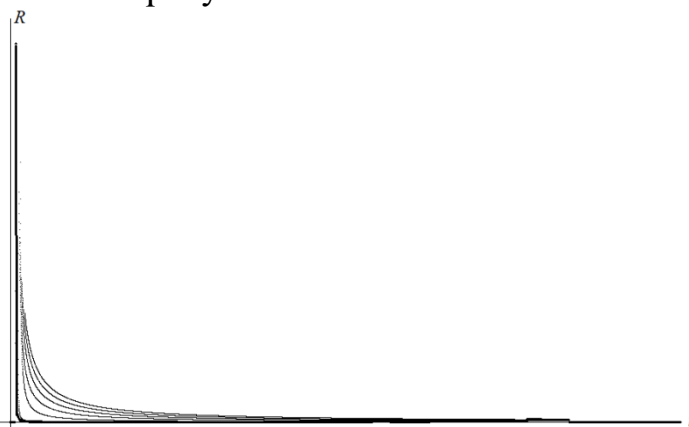


Рисунок 3 – Сопротивление слоев (тонкие линии) и общее сопротивление зоны контакта

Положение всех промежуточных зерен сектора можно упорядочить по моменту входа в соприкосновение с совокупным следом, образовавшимся от действия предыдущих зерен. В данной работе ранжирование проведено более упрощенно – по углу входа вершин зерен внутрь снимаемого при обработке слоя (номера зерен – 1, 2, ..., 122). Конкретное число зерен, участвующих в процессе обработки, зависит от кинематики движения круга.

Для зерен, следующих за исходным нулевым, резание заготовки примыкающей к вершине частью зерна также имеет место, но достигаемое этими зернами углубление царапины незначительно и только на участке вблизи конечной точки следа от предыдущих зерен оно возрастает. Однако возможная длина такого участка до момента выхода зерна из заготовки мала сравнительно с полной длиной зацепления между зерном и деталью. Поэтому процесс выдавливания материала привершинной зоной промежуточных зерен в дальнейшем рассмотрение не включен. Основную роль в съеме материала играет увеличение ширины следа.

Таким образом, для промежуточных зерен использована следующая расчетная схема: снимаемый с боковой поверхности следа материал движется по передней грани зерна до момента встречи с таким же слоем, идущим по смежной грани, после чего два этих потока начинают двигаться совместно в сторону основы круга так, что плоскость их движения остается неизменной. Как и для нулевого зерна полагается, что после встречи с основой стружка либо ломается, либо расплавляется, так что в целом общая длина участка сопротивления стружки остается фиксированной при непрерывно изменяющейся площади ее сечений. Для некоторых точек режущих кромок длина возникшей стружки может оказаться недостаточной для замыкания цепи.

Просчитаны случаи:  $V_p=1000$  и  $10000$  мм/мин,  $n=250, 500, 1000, 2000$  об/мин. Пример развития процесса на зернах сектора показан на рисунке 4.

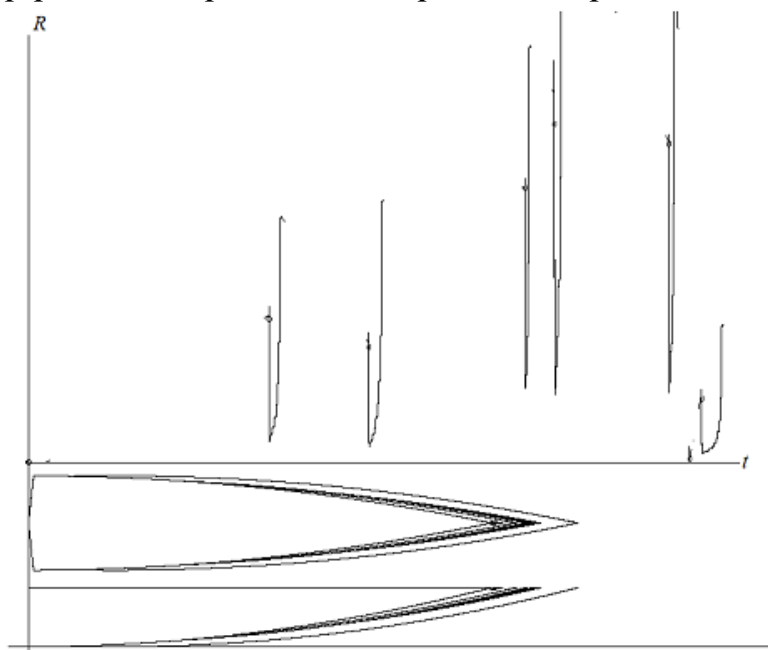


Рисунок 4 – Горизонтальные и вертикальные проекции следов от режущих зерен и сопротивление стружки для режима  $n=250$  об/мин,  $V_p=1000$  мм/мин

Используя далее формулы для электрической мощности  $W(t)=U^2/R(t)$  и сопротивления проводника  $R(t)$ , можно определить уровень энергии, выделяемой токопроводящим участком стружки за время электроконтакта ( $U$  – электрический потенциал между деталью и основой круга). Удельное сопротивление материала принято равным  $7.3 \cdot 10^{-5}$  ом·м. Результаты расчетов указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры стружкообразования на различных режимах работы абразивного круга

Режим	Режущие зерна	Время конца зацепления, сек·10 <sup>2</sup>	Длина следа, мм	Объем удаленного материала, м <sup>3</sup> ·10 <sup>13</sup>	Выделение энергии на нулевом и остальных зернах сектора, дж/вольт <sup>2</sup>
n=250 V <sub>p</sub> =1000	0, 52, 71, 92, 97, 117, 122	0.107982	3.554770	V <sub>0</sub> =18.82614	Q <sub>0</sub> =1.511614
		4.107993	4.221442	V <sub>C</sub> =15.550003	ΔQ <sub>сум</sub> =50.04158·10 <sup>-3</sup>
n=500 V <sub>p</sub> =1000	0, 52, 71, 122	0.053993	3.545872	V <sub>0</sub> =18.77814	Q <sub>0</sub> =0.753825
		2.053993	3.712562	V <sub>C</sub> =8.142092	ΔQ <sub>сум</sub> =11.46178·10 <sup>-3</sup>
n=1000 V <sub>p</sub> =1000	0, 122	0.026997	3.541424	V <sub>0</sub> =18.75414	Q <sub>0</sub> =0.376445
		1.026997	3.708096	V <sub>C</sub> =3.974066	ΔQ <sub>сум</sub> =3.56761·10 <sup>-3</sup>
n=2000 V <sub>p</sub> =1000	0, 122	0.013498	3.539199	V <sub>0</sub> =18.74214	Q <sub>0</sub> =0.188106
		0.513497	3.580595	V <sub>C</sub> =1.961258	ΔQ <sub>сум</sub> =0.92333·10 <sup>-3</sup>
n=1000 V <sub>p</sub> =10000	0, 52, 71, 92, 97, 110, 117, 122	0.026996	3.581820	V <sub>0</sub> =18.97013	Q <sub>0</sub> =0.380817
		10.26996	5.248492	V <sub>C</sub> =37.813936	ΔQ <sub>сум</sub> =27.44746·10 <sup>-3</sup>
n=2000 V <sub>p</sub> =10000	0, 52, 71, 92, 97, 117, 122	0.013498	3.559218	V <sub>0</sub> =18.85014	Q <sub>0</sub> =0.189194
		5.134976	4.392558	V <sub>C</sub> =19.202304	ΔQ <sub>сум</sub> =7.66504·10 <sup>-3</sup>

Из таблицы видно, что в зависимости от кинематических параметров режимов обработки ( $n$  и  $V_p$ ) и исходных данных по размерам и положению промежуточных зерен имеет место большая вариация результатов, но для одного и того же зерна при заданном  $V_p$  суммарное время электрического контакта между деталью и основой круга тем больше, чем меньше отношение  $n/V_p$ . Ожидаемое выделение тепла при внедрении исходного нулевого зерна в заготовку на порядки превосходит тепло, выделяемое при образовании стружки последующими зернами, что связано с большой разницей в толщинах материала, извлекаемого при этом из заготовки. Рост скорости продольной подачи заметно увеличивает выделение тепла стружкой, но незначительно влияет на тепло, выделяемое при внедрении исходного нулевого зерна в заготовку.

Приведенные выше результаты показывают сложный характер развития процессов резания и электропроводимости между обрабатываемой деталью и основой абразивного круга. Так как при этом изменяется и течение сопутствующих тепловых процессов, то для выбора материала и конструктивных параметров круга, а также оптимизации режимов обработки конкретных деталей целесообразно проведение предварительных расчетов на соответствующих моделях.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Нерода, М. В. Моделирование процесса абразивного резания упрочняющего покрытия кругом с ориентированными зернами в форме гексаэдра при магнитно-электрическом шлифовании (мэш) / М. В. Нерода, Б. Г. Холодарь // Вестник БрГТУ. – 2020. – № 4: Машиностроение. – С. 13–17.
2. Качанов, Л. М. Основы теории пластичности / Л. М. Качалов. – М., Наука, 1969 г. – 420 с.