

1. Грабченко, А.И. Интегрированные процессы обработки материалов резанием: учебник для высш. учебн. заведений / А.И. Грабченко, В.А. Залого В.А. (ред.). – Сумы: Университетская книга, 2017. – 451 с.

2. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н.В. Новикова и С.А. Клименко. – Изд-е 2-е перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 2014. – 608 с.

УДК 621.921

## **АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МЕЛКОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС МЕТОДОМ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ**

*Магистрантка – Акопова С.С., змаг 17 тс, ФТС*

*Научный*

*руководитель – Сергеев Л.Е., к.т.н., доцент*

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Республика Беларусь*

Важной и ответственной задачей, стоящей перед машиностроительной промышленностью, является создание принципиально новых машин и оборудования, которые должны обеспечивать качественно новые технологии производства, позволяющие увеличивать производительность труда.

Повышение производительности процесса изготовления и качества изделий достигается путем комплексной механизации и автоматизации производства, применением высокоэффективных методов механической, в частности, финишной обработки. Поэтому задачу интенсификации производства следует решать путем создания принципиально новых методов механической обработки, основанных на ином характере взаимодействия инструмента с поверхностью детали.

К числу таких перспективных методов относится процесс магнитно-абразивной обработки (МАО). Этот процесс стабильно обеспечивает получение шероховатости поверхности  $R_a = 0,01 - 0,4$  мкм, температур процесса значительно ниже в сравнении с традиционными методами механической обработки, что способствует образованию качественной структуры поверхностного слоя.

Проектирование процессов изготовления зубчатых колес основано на технологической классификации деталей, служащей

базой для построения типовых технологических процессов изготовления зубчатых колес. Основными факторами, определяющими типовой технологический процесс изготовления зубчатого колеса, являются конструктивные размеры и форма детали, способ получения заготовок, точность изготовления и программа выпуска.

Полученные результаты экспериментальных исследований [1] процесса обработки уплотненным потоком свободного абразива во взвешенном состоянии показывают, что съем металла, обеспечивался практически во всем диапазоне исследованных скоростей системы и контейнера при всех исследованных зернистостях ферроабразивного порошка (ФАП). С увеличением зернистости абразива, применяемого при обработке, съем металла возрастает, а шероховатость поверхности уменьшается. Отмеченное противоречие обуславливается особенностями абразивного воздействия в этом процессе и может быть объяснено только с позиций резания металла микропрофилем абразивного зерна. Основная часть абразивных зерен на этой стадии производит пластическое деформирование, снимая одновременно небольшой слой металла за счет микровыступов и субмикровыступов. В отличие от снятия металла вершиной абразивного зерна, которое называют микрорезанием, назовем съем металла микропрофилем зерна «микроскоблением», а съем металла, субмикропрофилем – «субмикроскоблением». После 1-2 минут обработки происходит своеобразная приработка отдельных абразивных зерен, в результате которой острые вершины зерен притупляются и радиусы округления вершин увеличиваются. Контактное взаимодействие таких абразивных зерен принимает другой характер и переходит в зону упругого деформирования.

При изломе абразивных зерен всегда образуется новый субмикропрофиль, параметры которого зависят от вида абразивного материала. Поэтому съем металла на уровне микроскобления и субмикроскобления будет продолжаться. Давление абразивного зерна на обрабатываемую поверхность остается практически постоянным и достаточным для обеспечения резания металла на этом уровне. В связи с этим на данной стадии обработки часть абразивных зерен производит упругое деформирование, а часть – пластическое. Полученные результаты

дают основание сформулировать несколько иное отношение к сложившейся классификации абразивного воздействия при шлифовании. Как указывалось выше, она предусматривает три вида абразивного воздействия: микрорезание, упругое и пластическое деформирование.

При обработке деталей уплотненным абразивом формируется абразивный брусок. В процессе обработки единичные зерна абразивного бруска, находясь под действием сил механического уплотнения и осциллирующего движения, обладают определенной степенью свободы. Абразивные зерна, особенно контактирующие с обрабатываемой поверхностью, могут поворачиваться, изменять свое положение.

Несмотря на имеющееся отличие рассматриваемого способа от известных, можно провести некоторую аналогию между данным способом обработки и процессом хонингования абразивными брусками, хотя там абразивные зерна связаны и не имеют такой степени свободы.

В рассматриваемом способе обработки практически с самого начала идет процесс самозатачивания на уровне микропрофиля абразивного зерна. В результате контактирования с обрабатываемой поверхностью и трения между абразивными частицами при их повороте имеют место частичное скалывание и выкрашивание отдельных вершин. При этом микропрофиль абразива обновляется и его режущие свойства поддерживаются на определенном уровне.

Известно, что абразивная способность связанного абразива практически в любом способе обработки выше, чем свободного. Кроме того, съем металла на уровне микроскобления и субмикроскобления происходит менее интенсивно, чем при микрорезании абразивным зерном, поэтому требуется больше времени на удаление исходной шероховатости.

Приведенные данные дают основание сравнить совокупность уплотненных абразивных зерен, контактирующих с обрабатываемой поверхностью, с мелкозернистым профильным абразивным бруском (хоном), работающим по принципу самозатачивания и производящим резание металла микропрофилем выступающих вершин (рис. 1).

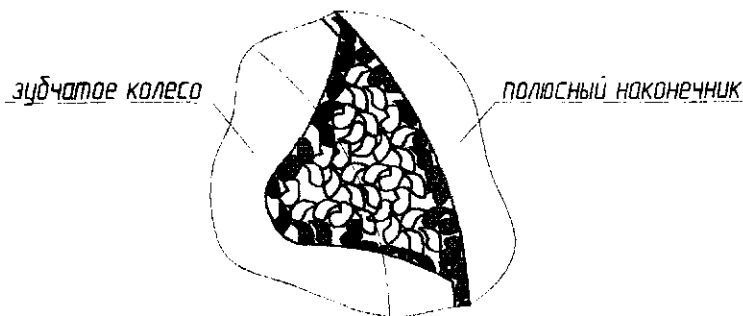


Рисунок 1 – Схема работы уплотненного абразивного бруска во впадине зубчатого колеса

Анализ процесса резания и состояния абразивных зёрен в рассматриваемом способе обработки показывает, что определенную роль в процессе съема металла играют микроскопические частицы абразива, образованные сколами вершин абразивных зёрен. Сами абразивные зёрна в данном случае выступают в роли притира.

В данном случае помимо механического уплотнения ФАП во впадине колеса зёрна связывает магнитное поле. На основании ранее проведенных исследований [2], рассмотрим возникновение сил магнитного поля, действующих на ферромагнитное зерно в радиальном направлении к обрабатываемой поверхности зуба. При заполнении рабочей зоны ферромагнитным порошком пространство между обрабатываемой поверхностью и поверхностью полюсного наконечника рассматривается как область внешнего магнитного поля напряженностью  $H$ , в котором расположены два ферромагнитных тела: обрабатываемая деталь и ферромагнитное зерно. Согласно законам электромагнетизма, между ними возникает сила взаимодействия, которая стремится прижать ферромагнитное зерно к детали.

Магнитное поле в рабочем зазоре в радиальном направлении неоднородно, и вектор магнитной индукции направлен по нормали к рабочей поверхности полюсного наконечника и обрабатываемой детали (рис. 2)

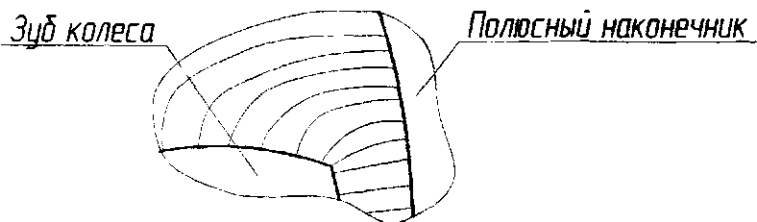


Рисунок 2 – Направление силовых линий магнитного поля в среде уплотненного ФАП

При этом ферромагнитное зерно за счет механического взаимодействия соседних зерен наибольшей осью  $L_{\text{макс}}$  может быть расположено как вдоль силовых линий, так и под углом  $\alpha$  к ним. Рассмотрим общий случай, когда ферромагнитное зерно расположено под углом  $\alpha$  к магнитным силовым линиям (рис. 3).

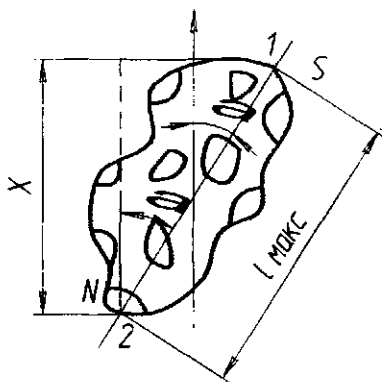


Рисунок 3 – Схема сил, действующих на зерно и ориентирующих его в магнитном поле

Находясь во внешнем магнитном поле, ферромагнитное зерно намагничивается. При этом наибольший магнитный момент будет в плоскости, проходящей через наибольшую ось зерна. Если напряженность в точке 1 (рис. 3) будет  $H_1$ , то напряженность в точке 2, где расположен противоположный полюс, равна

$$H_2 = H_1 + (\Delta H / \Delta x)x,$$

где  $(\Delta H / \Delta x)$  – градиент магнитного поля.

Силы, действующие на зерно, соответственно будут равны

$$P_{m1} = mH; (1)$$

$$P_{m2} = mH + m(\Delta H / \Delta x)x,$$

где  $m$  – магнитная масса ферромагнитного зерна.

При положительном градиенте

$$P_{m2} > P_{m1}$$

на ферромагнитное зерно действует пара сил с моментом

$$M = F_s l \sin \alpha = M_3 H \sin \alpha,$$

где  $M_3 = ml$  – магнитный момент ферромагнитного зерна.

Следовательно, ферромагнитное зерно в неоднородном магнитном поле, действующем в радиальном направлении к обрабатываемой поверхности зуба, будет поворачиваться, стремясь занять такое положение, при котором его наибольшая ось будет параллельна внешнему магнитному полю.

Кроме того, на зерно будет действовать сила, направленная вдоль поля. Величина этой силы определяется из уравнения

$$P_{m3} = P_{m2} - P_{m1} = m(\Delta H / \Delta x)x.$$

Так как

$$x = l_{\max} \cos \alpha,$$

то

$$P_{m3} = ml_{\max} (\Delta H / \Delta x) \cos \alpha.$$

Заменяя  $ml$  через магнитный момент  $M_3$ , получаем

$$P_{m3} = M_3 (\Delta H / \Delta x) \cos \alpha.$$

Магнитный момент ферромагнитного зерна зависит от его размеров и магнитных свойств материала. С учетом того, что ферромагнитные зерна по форме в первом приближении представляют собой эллипсоиды вращения, их магнитный момент равен

$$M_3 = 4/3 \pi a b^2 k_m H,$$

где  $a = l_{\max}/2$ ,  $b = l_{\min}/2$  – полуоси эллипсоида ( $l_{\max}$  и  $l_{\min}$  – наибольший и наименьший размеры зерна);  $k_m$  – магнитная восприимчивость;  $H$  – напряженность магнитного поля.

Подставив значение  $M_3$  в формулу (1), получим уравнение для расчета силы, действующей на зерно порошка вдоль магнитного поля, в окончательном виде:

$$P_{m3} = 4 / 3 \pi a b^2 k_m (\Delta H / \Delta x) \cos \alpha. (2)$$

Следует отметить, что величина давления ферромагнитного порошка на обрабатываемую поверхность, рассчитанная по формуле (2), не может быть определена для всего пространства

рабочего зазора, а только для элементарных участков  $AS$ , которые имеют одинаковую магнитную проницаемость и на которых зерна расположены только в граничном слое. По этой формуле можно рассчитать давление единичных зерен. Образование цепочек из плотно прижатых между собой ферромагнитных зерен изменяет характеристики давления в зазоре вследствие изменения магнитного момента зерен, сориентированных в цепочку.

На основании ранее проделанных исследований [2] рассмотрим образование цепочки зерна. Внешнее магнитное поле, создаваемое катушками электромагнитной системы, наводит в ферромагнитных зернах свое локализованное магнитное поле, которое взаимодействует с магнитными полями детали и полями ферромагнитных зерен. Магнитный поток, созданный локализованным магнитным полем, стремится замкнуться через контур, имеющий наименьшее магнитное сопротивление. Если по соседству окажутся два ферромагнитных зерна, то их магнитные поля замкнутся взаимно через эти зерна. Если же ферромагнитное зерно окажется возле обрабатываемой детали, то его локализованное поле замкнется через обрабатываемую поверхность. В первом случае зерна окажутся прижатыми друг к другу, а во втором ферромагнитное зерно прижмется к обрабатываемой детали. В прижатых друг к другу ферромагнитных зернах наводится новое магнитное поле и соответственно возрастает магнитный момент. Наведенное новое локализованное поле взаимодействует с полями новых ферромагнитных зерен, и таким образом происходит формирование цепочек зерен. Цепочки, обладая значительно большим по сравнению с единичным зерном магнитным моментом, занимают в зоне обработки устойчивое положение. Они не разрушаются вследствие излома или износа граничного с обрабатываемой поверхностью ферромагнитного зерна. Это объясняется тем, что удаление одного зерна из цепочки незначительно изменяет магнитный момент всей цепочки, поэтому она остается сориентированной вдоль силовых линий и после разрушения граничного с обрабатываемой поверхностью зерна.

Следовательно, съем металла и само абразивное воздействие при обработке деталей уплотненным способом абразива связанным магнитным полем и ориентированным им в процессе его приработки имеют несколько иную качественную основу. Хотя в

рассматриваемом методе обработки происходят процессы тонкого пластического деформирования и резания, аналогичные известным методам финишной обработки, эти процессы имеют иные количественные характеристики. Совокупность изменений количественных характеристик приводит к существенному качественному отличию рассматриваемого процесса. Его особенность заключается в том, что форму инструмента, включающего ФАП, задают рабочая зона и магнитное поле, выполняющее роль связки и ориентации осей зерен. Образуется инструмент, в точности копирующий обрабатываемую поверхность с постоянно обновляющимися режущими свойствами.

Способ МАО эквидистантными полюсными наконечниками разомкнутой электромагнитной системы, эффективный для обработки цилиндрических и фасонных поверхностей тел вращения, не пригоден для практического применения при обработке сложнопрофильных поверхностей тел вращения.

На основании анализа распределения параметров магнитного поля во впадине зубчатого колеса установлено, что электромагнитная схема установки с эквидистантными полюсными наконечниками позволяет устойчиво обрабатывать зубья с модулем  $m < 1,0$  мм; при данной схеме обработки магнитное поле оказывает силовое воздействие на рабочую поверхность на расстояние не более 2 мм от продольной кромки зуба.

1 Ящерицын, П.И. Финишная обработка деталей уплотненным потоком свободного абразива / П.И. Ящерицын, А.Н. Мартынов, А.Д. Гридин. – М.: Наука и техника, 1978. – с. 130.

2. Коновалов, Е.Г. Основы электроферромагнитной обработки / Е.Г. Коновалов, Ф.Ю. Сакулевич. – Мн.: Наука и техника, 1974. – с. 31–33, с. 34.