

ФИНИШНАЯ АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА МЕЛКОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Л.М. Акулович,

профессор каф. технологии металлов БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

Л.Е. Сергеев,

доцент каф. технологии металлов БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Е.В. Сенчуров,

начальник отдела внедрения НТР НИИМЭСХ БГАТУ

С.С. Аكوпова,

магистрант БГАТУ

В статье рассматривается процесс магнитно-абразивной обработки (МАО) мелко модульных зубчатых колес. Экспериментально установлено повышение геометрической точности профиля зуба и качества его рабочей поверхности. Приведены результаты исследований технологических возможностей магнитно-абразивной обработки.

Ключевые слова: зубчатое колесо, магнитно-абразивная обработка, качество поверхности.

The process of magnetic abrasive processing (MAP) of fine-grained gear is considered in the article. The increase of the geometric accuracy of the tooth profile and the quality of its working surface is experimentally established. The results of studies of the technological capabilities of magnetic abrasive processing are given.

Key words: gear, magnetic abrasive processing, surface quality.

Введение

Зубчатые передачи, в том числе мелко модульные, широко используются в узлах машин и агрегатов агропромышленного комплекса [1-3]. От их качества и нагрузочной способности зависит долговечность, надежность машин и механизмов. Требованием для всех типов передач является обеспечение работоспособности с заданной вероятностью безотказной работы. Так как ресурс работы мелко модульных зубчатых передач напрямую зависит от геометрической точности профилей контактирующих пар и показателей качества их поверхностей [4], то актуальными остаются вопросы совершенствования технологического процесса изготовления мелко модульных зубчатых колес на базе применения финишных методов обработки.

Цель настоящей работы – исследование технологических возможностей процесса МАО мелко модульных зубчатых колес, полученных накатыванием.

Основная часть

Среди применяемых методов изготовления мелко модульных зубчатых колес ($0,3 \leq m \leq 1$ мм) наиболее прогрессивным является способ холодного накатывания без принудительного деления, который позволяет обеспечивать 6-7 степень точности по ГОСТ 1643-81 [5]. Однако в результате взаимного скольжения заготовки и инструмента (накатника) друг относи-

тельно друга на противоположных рабочих сторонах профиля зуба заготовки, металл течет в разных направлениях. Такой характер деформации металла по сторонам зуба создает погрешности симметричности профиля, кроме этого, образуются погрешности формы наружного диаметра обрабатываемого колеса [4]. Рассматривая в заготовке после накатывания полученный зуб в отдельности, можно видеть наплывы металла (рис. 1). Несмотря на принимаемые меры [4, 5] по устранению данного недостатка, полностью удалить этот наплыв не удается.

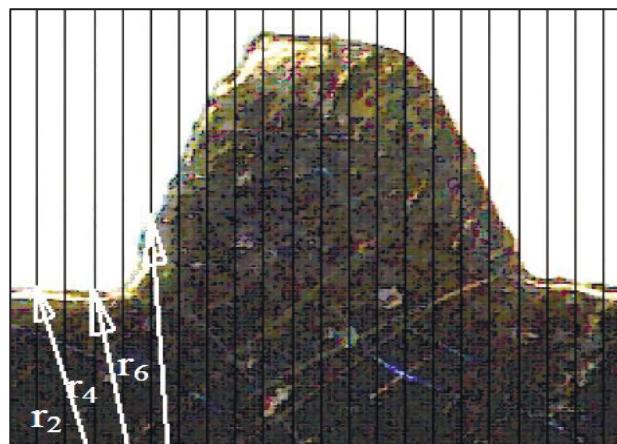


Рис. 1. Профиль зуба после холодного накатывания [4]

На практике наиболее простым способом решения этой проблемы является шлифование по наружному диаметру зубчатого колеса после закалки, но при такой обработке на зубьях образуется большое количество заусенцев и острых кромок. Кроме того, выделяемое при шлифовании тепло вызывает структурные изменения в поверхностном слое в виде прижогов и внутренние растягивающие напряжения. При превышении этими величинами напряжений предела прочности появляются шлифовочные трещины [6].

Для устранения указанных дефектов поверхностного слоя, после шлифования требуется последующая финишная обработка, к видам которой можно отнести притирку, зубохонингование и электрохимическую обработку. Вместе с тем эти способы имеют ряд характерных недостатков. К ним относятся: высокая трудоемкость процесса обработки, низкая стойкость инструмента, экологическая вредность производства и т.п. К тому же использование зубохонингования зубчатых колес с малым модулем практически затруднено [5]. В последнее время широкое распространение получила финишная обработка, в том числе гибким абразивным инструментом на основе полимерно-абразивного волокна (25-35 % абразивных зерен в объеме полимерного волокна). Однако низкая теплостойкость полимерной основы требует строгого соблюдения температурного режима, что ограничивает применение данного способа [7].

В связи с ростом требований к качеству выпускаемой продукции все больше ощущается необходимость использования новых методов финишной обработки, одним из которых является магнитно-абразивная обработка [8-10], при которой в роли режущего инструмента выступает рабочая технологическая среда (РТС), включающая частицы ферроабразивного порошка (ФАП), смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС) и электромагнитное поле (ЭМП) (рис. 2). Ферроабразивная щетка из ФАП и СОТС формируется в зазоре δ между обрабатываемой поверхностью и полюсным наконечником электромагнита силами ЭМП и представляет собой

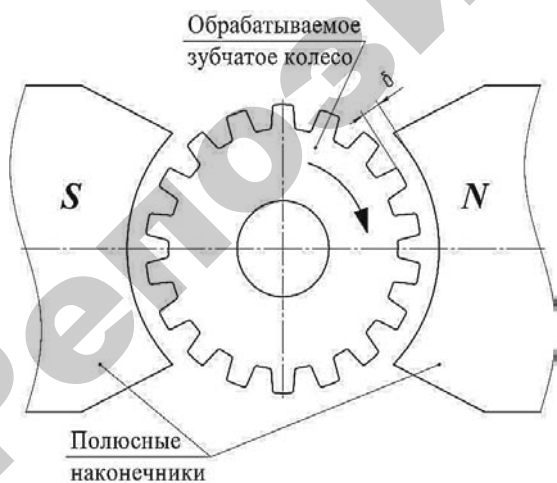


Рис. 2. Схема магнитно-абразивной обработки мелкозубчатых цилиндрических зубчатых колес

набор цепочек зерен ФАП (3-10 зерен) [8]. Данное обстоятельство делает МАО не менее эффективным в сравнении с финишной обработкой щеточным инструментом на основе полимерно-абразивного волокна при отсутствии вышеуказанных температурных ограничений.

Отличительной особенностью МАО от вышеперечисленных финишных способов чистовой обработки является возможность управления движением абразивных частиц в зоне обработки путем изменения осциллирующего движения и, главным образом, за счет изменения величины магнитного потока, и, как следствие, давления абразивных зерен на обрабатываемую поверхность, что позволяет производить обработку без образования микротрещин, надрывов, шаржирования, равномерно удалять металл с обрабатываемой поверхности, упрочнять поверхностный слой, снижать остаточные растягивающие напряжения с переходом их в сжимающие.

Проблема финишной обработки профиля зубчатых передач и, в частности, МАО заключается в сложности съема материала заготовки ввиду разных по величине диаметров окружностей впадин и выступов. Для МАО это связано с тем, что по мере удаления обрабатываемой поверхностей от источника магнитного поля, согласно законам электромагнетизма, его воздействие на тело ослабевает. Падение напряженности поля, являющейся силовой характеристикой, приводит соответственно к уменьшению давления ФАП на обрабатываемую поверхность, а в конечном итоге и к снижению съема металла. По данным [11], магнитное поле, проникающее в паз, затухает на глубине, примерно равной его ширине.

Механизм процесса съема материала при МАО можно уподобить обработке уплотнением абразивом. При этом единичные абразивные зерна, находясь под действием сил механического уплотнения и осциллирующего движения, обладают определенной степенью свободы. Абразивные зерна, особенно контактирующие с обрабатываемой поверхностью, могут поворачиваться, т. е. менять 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.

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. 3).

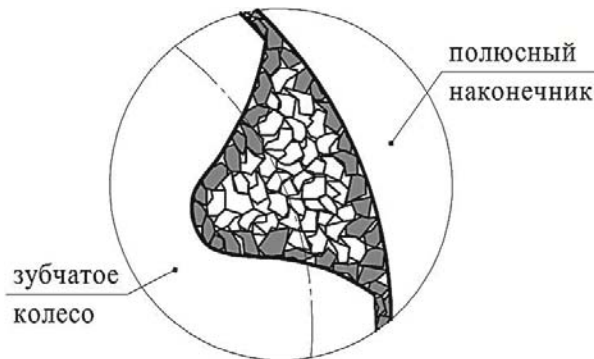


Рис. 3. Схема расположения уплотненного абразивного бруска во впадине зубчатого колеса [12]

Анализ процесса резания и состояния абразивных зерен в рассматриваемом способе обработки показывает, что, возможно, определенную роль в процессе съема металла играют микроскопические частицы абразива, образованные сколами вершин абразивных зерен. Можно предположить, что эти частицы абразива также принимают участие в микрорезании при перемещении их абразивными зернами по обрабатываемой поверхности. Сами абразивные зерна в данном случае выполняют роль притира.

В нашем случае, помимо механического уплотнения ФАП, во впадине колеса зерна связывает магнитное поле. Рассмотрим возникновение сил магнитного поля, действующих на ферромагнитное зерно в радиальном направлении к обрабатываемой поверхности зуба [13]. При заполнении рабочей зоны ферромагнитным порошком пространство между обрабатываемой поверхностью и поверхностью полюсного наконечника можно рассматривать 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.

При этом ферромагнитное зерно за счет механического взаимодействия соседних зерен наибольшей осью l_{\max} может быть расположено как вдоль силовых линий магнитного поля B , так и под углом α к ним. Рассмотрим общий случай, когда ферромагнитное зерно расположено под углом α к магнитным силовым линиям (рис. 4).

Находясь во внешнем магнитном поле, ферромагнитное зерно намагничивается. При этом наибольший магнитный момент будет в плоскости, проходящей через наибольшую ось зерна [12]. Если напряженность в точке 1 (рис. 4) будет H_1 , то напря-

женность в точке 2, где расположен противоположный полюс, равна

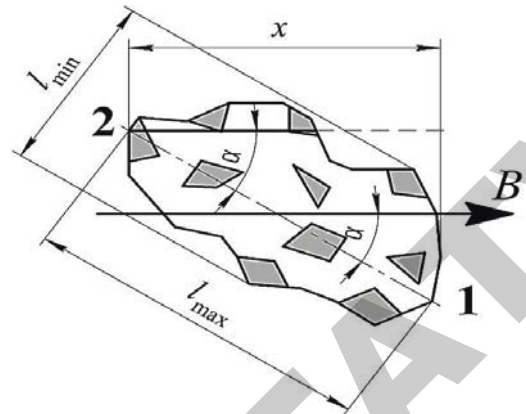


Рис. 4. Схема ориентации ферроабразивного зерна в магнитном поле

$$H_2 = H_1 + \frac{\Delta H}{\Delta x} x, \quad (1)$$

где $\frac{\Delta H}{\Delta x}$ – градиент магнитного поля, A/m^2 .

Силы, действующие на зерно в точках 1 и 2, соответственно будут равны

$$P_{m1} = mH; \quad (2)$$

$$P_{m2} = m \left(H + \frac{\Delta H}{\Delta x} x \right), \quad (3)$$

где m – магнитная масса ферромагнитного зерна. При положительном градиенте

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

на ферромагнитное зерно действует пара сил с моментом [12]

$$M = M_3 H \sin \alpha, \quad (4)$$

где $M_3 = ml$ – магнитный момент ферромагнитного зерна, $A \cdot m^2$.

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 магнитного поля. Величина этой силы определяется из уравнения

$$P_{m3} = m \frac{\Delta H}{\Delta x} x. \quad (5)$$

Так как $x = l_{\max} \cos \alpha$, то

$$P_{m3} = ml_{\max} \frac{\Delta H}{\Delta x} \cos \alpha. \quad (6)$$

Заменяя ml_{\max} через магнитный момент M_3 , получаем

$$P_{M3} = M_3 \frac{\Delta H}{\Delta x} \cos \alpha. \quad (7)$$

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

$$M_3 = \frac{4}{3} \pi a b^2 k_M H, \quad (8)$$

где $a=0,5l_{\max}$, $b=0,5l_{\min}$ – полуоси эллипсоида (l_{\max} и l_{\min} – наибольший и наименьший размеры зерна (рис. 4)), м;

k_M – магнитная восприимчивость;

H – напряженность магнитного поля, А/м.

Подставив значение M_3 в формулу (2), получим уравнение для расчета силы, действующей на зерно порошка вдоль магнитного поля, в окончательном виде:

$$P_{M3} = \frac{4}{3} \pi a b^2 k_M H \frac{\Delta H}{\Delta x} \cos \alpha. \quad (9)$$

Следует отметить, что величина давления ферромагнитного порошка на обрабатываемую поверхность, рассчитанная по формуле (4), не может быть определена для всего пространства рабочего зазора, а только для элементарных участков ΔS , 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, ориентированных в цепочку.

На основании ранее проделанных исследований [13] 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.

Из изложенного выше видно, что 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 способе обработки происходят процессы тонкого пластического деформирования и резания, аналогичные некоторым известным методам финишной обработки, эти процессы имеют совершенно иные количественные характеристики. Совокупность измененных количественных характеристик приводит к существенному качественному отличию рассматриваемого процесса. Его особенность заключается в том, что форму инструмента (ФАП) задают рабочая зона и магнитное поле, выполняющее роль связки и ориентации осей зерен. Обрабатывается инструмент, в точности копирующий обрабатываемую поверхность с постоянно обновляющимися режущими свойствами.

Следовательно, чем меньше модуль зубчатого колеса, тем эффективнее происходит процесс съема материала обрабатываемого изделия данным способом. Кроме того, положительным фактором данного процесса служит то, что контур зуба имеет эвольвентный профиль (его условно можно считать трапециевидным), что увеличивает эффективность доступа ФАП в рабочую зону и повышает качество обрабатываемых поверхностей. Вторым достоинством является то, что острая кромка зуба представляет собой концентратор магнитного потока и именно здесь будет наибольшей его плотность. Это обеспечивает рост давления ФАП и соответственно массовый съем материала.

На основании вышеизложенного были проведены исследования, направленные на оценку технологических возможностей метода МАО при обработке мелко-модульных зубчатых колес ($m=1$ мм, угол наклона зуба $\beta=12^\circ$, сталь 40Х ГОСТ 4543-71, 40-44 HRC).

Основная задача при проведении экспериментов по МАО мелко-модульного зубчатого профиля заключалась в скруглении фаски зубчатого колеса по контуру, устранении заусенцев, образованных предшествующей операцией шлифования по наружному диаметру колеса, и снижении шероховатостей рабочей поверхности зуба.

Режимы обработки: скорость резания – $V_p = 1,5-2$ м/с; амплитуда осцилляции – $A = 1,5-2$ мм; скорость осцилляции – $V_o = 0,15-0,3$ м/с; зазор в рабочей зоне обработки – $\delta = 1$ мм; магнитная индукция – $B = 0,8-1,1$ Т; время обработки $t = 60$ с. ФАП – Ж15КТ (FeTiC) ТУ 6-09-03-483-81; размер частиц – $\Delta = 100/160$ мкм; коэффициент заполнения рабочего

ззора – $K_3 = 1$; СОТС – СинМА-1 ТУ 38.59011 76-91, 3%-й водный раствор. В качестве оборудования использовалась установка СФТ 2.150.00.00.000. Измерение шероховатости производилось на профилографе-профилометре мод. 252 «Калибр».

Обязательным условием этого процесса является реверсирование вращения заготовки. Полное время обработки составляет 60 с, из них соответственно 30 с – вращение по часовой стрелке и 30 с – против. Возможно использование пакетного способа обработки при наличии разделительных колец толщиной 1-3 мм. Общая длина пакета вдоль оси обработки должна равняться в среднем 70 мм.

После МАО, детали, изготовленные из ферромагнитного материала, в обязательном порядке должны быть демагнитизированы с целью исключения остаточной намагниченности.

Проведенными испытаниями установлено, что после обработки методом МАО (для сравнения на рис. 5 представлены зубчатые колеса после различных методов обработки):



Рис. 5. Заготовка зубчатого колеса:

а – после шлифования; б – после термической обработки и шлифования; в – после МАО

– на торцах зубьев образуются фаски в форме запытой, ширина которой уменьшается в направлении дна впадины зуба;

– зона обработки характеризуется полным отсутствием заусенцев и следов термического разложения закалочной среды, часто имеющих место после нарушенный технологического процесса термообработки;

– воздействие магнитного поля на чувствительность обрабатываемого изделия приводит к образованию остаточных напряжений сжатия и улучшению ее структуры, что обеспечивает рост долговечности;

– угол фаски на боковой поверхности зуба находится в пределах 30-35°, ширина фаски – не более 0,8 мм.

Заключение

Таким образом, на основании проведенных исследований установлено, что в качестве эффективного метода финишной обработки мелко модульных зубчатых колес можно использовать способ МАО,

позволяющий получить высокие эксплуатационные характеристики этих деталей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агапов, С.И. Научное обоснование и реализация ультразвуковых технологий при производстве прецизионных мелко модульных колес: дис. д-ра техн. наук: 05.02.07 / С.И. Агапов. – Волгоград, 2015. – 346 л.
2. Канатников, Н.В. Повышение эффективности процесса зубостроения криволинейных конических колес: дис. канд. техн. наук: 05.02.07 / Н.В. Канатников. – Орел, 2014. – 154 л.
3. Мустафин, А.А. Разработка и обоснование параметров двухроторного двузубого вакуумного насоса для доильных установок: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.20.01 / А.А. Мустафин; Казанский государственный аграрный университет. – Чебоксары, 2013. – 16 с.
4. Вавилов, Д.В. Мелко модульные передачи механизмов приводов космических аппаратов на основе накатных зубчатых колес: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02 / Д.В. Вавилов; Сибирский федеральный университет. – Красноярск, 2009. – 20 с.
5. Лындин, В.А. Инструмент для накатывания зубьев и шлицев повышенной точности / В.А. Лындин. – М.: Машиностроение, 1988. – 144 с.
6. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач: учебное пособие / В.Е. Антонюк [и др.]; под общей ред. В.Е. Антонюка. – Минск: Технопринт, 2003. – 766 с.
7. Степанов, Д.Н. Финишная обработка тонкостенных и сложнопольных деталей. Сообщение 2. Щеточные инструменты / Д.Н. Степанов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2015. – С. 126-129.
8. Сакулевич, Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф.Ю. Сакулевич. – Минск: Наука и техника, 1981. – 326 с.
9. Скворческий, Н.Я. Эффективность магнитно-абразивной обработки / Н.Я. Скворческий, Э.Н. Федорович, П.И. Ящерицын. – Минск: Навука і тэхніка, 1991. – 276 с.
10. Kodacsy Jonas. Magneto-abrasives Polieren und Entgraten Witerenwikelte Feinbearbeitung / J. Kodacsy // Techn. Rdsch. – 1990. – № 37. – С. 76-79.
11. Брынский, Е.А. Электромагнитные поля в электрических машинах / Е.А. Брынский, Я.Б. Данилевич, В.И. Яковлев. – Л.: Энергия, 1979. – 176 с.
12. Миронов, А.М. Повышение эффективности магнитно-абразивной обработки зубчатых колес механическим уплотнением ферроабразивного порошка в рабочей зоне: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / А. М. Миронов. – Минск, 2007. – 153 л.
13. Коновалов, Е.Г. Основы электроферромагнитной обработки / Е.Г. Коновалов, Ф.Ю. Сакулевич. – Минск: Наука и техника, 1974. – 272 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 28.09.2018