

УДК 621.923

ФИНИШНАЯ АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ЭВОЛЬВЕНТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Л.М. Акулович,*профессор каф. технологии металлов БГАТУ, докт. техн. наук, профессор***Н.С. Хомич,***директор НИП «ПОЛИМАГ» БНТУ, канд. техн. наук***Л.Е. Сергеев,***доцент каф. технологии металлов БГАТУ, канд. техн. наук, доцент*

В статье рассмотрен процесс магнитно-абразивной обработки зубчатых колес, предложено использование реверсивного вращения детали, обеспечивающего равномерное распределение рабочей технологической среды при обработке зуба.

The article describes the process of magnetic-abrasive machining of gears, the use of reverse rotation of the parts proposed, providing a uniform distribution of the working environment at the technological processing of the coak.

Введение

В современном сельскохозяйственном машиностроении широкое распространение получили эвольвентные зубчатые передачи. От их работоспособности, качества и нагрузочной способности зависит долговечность, надежность машин и механизмов. Поэтому актуальными остаются вопросы совершенствования технологического процесса их изготовления на базе применения финишных методов обработки. Особое значение имеет шероховатость рабочей поверхности зубьев, так как для большинства зубчатых колес микронеровности, образовавшиеся на стадии механической обработки, сохраняются после химико-термической обработки и влияют на напряженно-деформированное состояние зубчатых колес при их эксплуатации [1].

В качестве финишных методов обработки зубьев для незакаленных зубчатых колес используются зубошевингование и калибрование, известен также способ, занимающий промежуточное место между калиброванием и шевингованием – «финишер» [2]. Для обработки закаленных зубчатых колес используются зубохонингование, обкатка и притирка [3]. Одним из широко применяемых методов является зубошлифование, которое позволяет обеспечить высокую точность зубчатого венца, устранить погрешности предварительной механической и химико-термической обработки. Однако 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 [4].

К числу перспективных методов финишной обработки относится магнитно-абразивная обработка (МАО), 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). Ферроабразивная щетка из ФАП и СОТС формируется в зазоре между обрабатываемой поверхностью и полюсным наконечником электромагнита силами ЭМП.

Отличительной особенностью МАО от вышеперечисленных финишных способов чистовой обработки является возможность управления движением абразивных частиц в зоне обработки за счет изменения осциллирующего движения и, главным образом, за счет изменения величины магнитного потока и, как следствие, силы давления на обрабатываемую поверхность, что позволяет производить обработку без микротрещин, надрывов, шаржирования, равномерно удалять металл с обрабатываемой поверхности, упрочнять поверхностный слой, снижать остаточные растягивающие напряжения с переходом их в сжимающие. Однако одной из проблем МАО зубчатых колес среднего и крупного модуля ($m > 1,5$ мм) является то, что РТС самостоятельно не заполняет впадину между зубьями. Это связано со стремлением магнитного потока осуществить свое прохождение по энергетически выгодному участку магнитной цепи, концентрируясь на продольных кромках зубьев. Главной задачей в этом случае является реализация заполнения частицами ФАП впадин зубчатого колеса.

При проведении МАО зубчатых колес ($m = 2,5$ мм; сталь 18ХГТ, 62...64 HRC) выявлено, что на разных сторонах зуба значения шероховатости не равномерны, от вершины к ножке зуба шероховатость увеличивается [5]. Обусловлено это тем, что в процессе обработки осуществлялось движение зубчатого колеса только против часовой стрелки, что способствовало более сильному прижатию ФАП к обрабатываемой левой стороне зуба.

Цель настоящей работы – исследование процесса МАО эвольвентных поверхностей, учитывая режим

кинематического состояния РТС, поскольку знание распределения РТС в рабочей зоне при МАО позволит осуществить прогнозирование процесса финишной обработки зубчатых колес.

Основная часть

РТС можно представить как пористую среду, состоящую из частиц порошка и пор, в которых протекает СОТС. С технологической точки зрения подача СОТС и течение ее в зоне обработки представляет собой организованный поток веществ. Основными характеристиками технологии подачи и движения СОТС в рабочем зазоре являются: тип потоков, способ обеспечения требуемого уровня турбулентности (ламинарности), числовые характеристики потоков [6]. При МАО тип потока СОТС различен в начале его формирования и в зоне обработки (при выходе СОТС из сопла – движение жидкости ламинарно, а при контакте с вращающейся деталью и инструментом поток жидкости турбулентен). Тип потока СОТС в зоне обработки оказывает существенное влияние на эффективность его функционального действия. С повышением турбулентности потока усиливаются охлаждающее и моющее действия, а при ламинаризации – смазочное и проникающее.

Величиной, определяющей изменение типа потока, является число Рейнольдса (Re), а устойчивость течений – число Стюарта (N)

$$\text{Re} = \frac{w_0 R}{\nu}; \quad N = \frac{\sigma B^2 R}{\rho w_0}, \quad (1)$$

где w_0 – скорость потока жидкости, м/с;

R – радиус канала, мм;

ν – кинематическая вязкость, сСт;

σ – электрическая проводимость, См;

B – магнитная индукция, Т;

ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Обтекание паза зубчатого колеса при наложении магнитного поля в зоне обработки рассматривается на основе уравнения (2) [7], которое численно рассчитывалось при помощи метода матричной прогонки для уравнения четвертого порядка

$$A(\psi) \equiv \frac{1}{\text{Re}} \nabla^4 \psi + \frac{D(\psi, \nabla^2 \psi)}{D(x, y)} - N \left(\sin \alpha \frac{\partial}{\partial y} + \cos \alpha \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 \psi = 0, \quad (2)$$

где A – оператор перехода от функции внешнего воздействия к функции отклика;

ψ – функция возмущения потока;

D – оператор дифференцирования потока;

α – угол между направлением магнитного поля, град;

x, y – координаты, м.

Уравнение (2) заменяется нестационарным уравнением

$$\frac{\partial \nabla^2 \psi}{\partial t} = L(\psi), \quad (3)$$

где L – оператор перехода от функции изменения возмущения потока по времени t , и решение стационарной задачи рассматривалось как предел при $t \rightarrow \infty$ решения нестационарной задачи. Уравнение (3) заменяется неявным разностным уравнением с порядком аппроксимации $O(h^2)^*$:

$$\frac{\nabla^2 \psi^{n+1} - \nabla^2 \psi^n}{\tau} = \frac{1}{\text{Re}} \nabla^4 \psi^{n+1} + \gamma \frac{(\psi^n, \nabla^2 \psi^{n+1})}{D(x, y)} + (1-\gamma) \frac{D(\psi^{n+1}, \nabla^2 \psi^n)}{D(x, y)} - N \left(\sin \alpha \frac{\partial}{\partial y} + \cos \alpha \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 \times \psi^n = L\psi^n; \quad (0 < \gamma \leq 1),$$

где γ – граничное условие;

n – целые положительные числа.

Модель обтекания паза зубчатого колеса имеет следующий вид (рис. 1). Из условия симметрии на S_0

$$\psi = 1; \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0;$$

на S_1 и S_2 условия периодичности:

$$\psi_1 = \psi_2; \quad \frac{\partial \psi_1}{\partial x} = \frac{\partial \psi_2}{\partial x};$$

на S_0 условие совмещения:

$$\psi = 0; \quad \frac{\partial \psi}{\partial n} = 0.$$

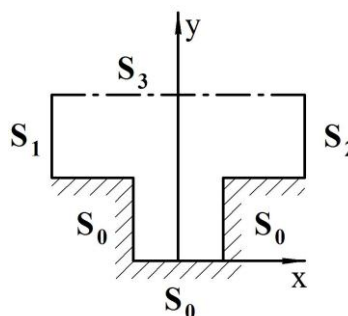


Рисунок 1. Модель обтекания паза зубчатого колеса

При задании начального условия использовался профиль Гартмана, отнесенный к наименьшей ширине канала. Для зазора зуба зубчатого колеса в начальный момент принималось $\psi = 0$.

Расчет производился при различных значениях Re и N, при различных отношениях размеров выступа к ширине канала и при различной ориентации магнитного поля [8].

На рисунке 2 приведены линии потока СОТС для различных случаев положения пазов при обработке

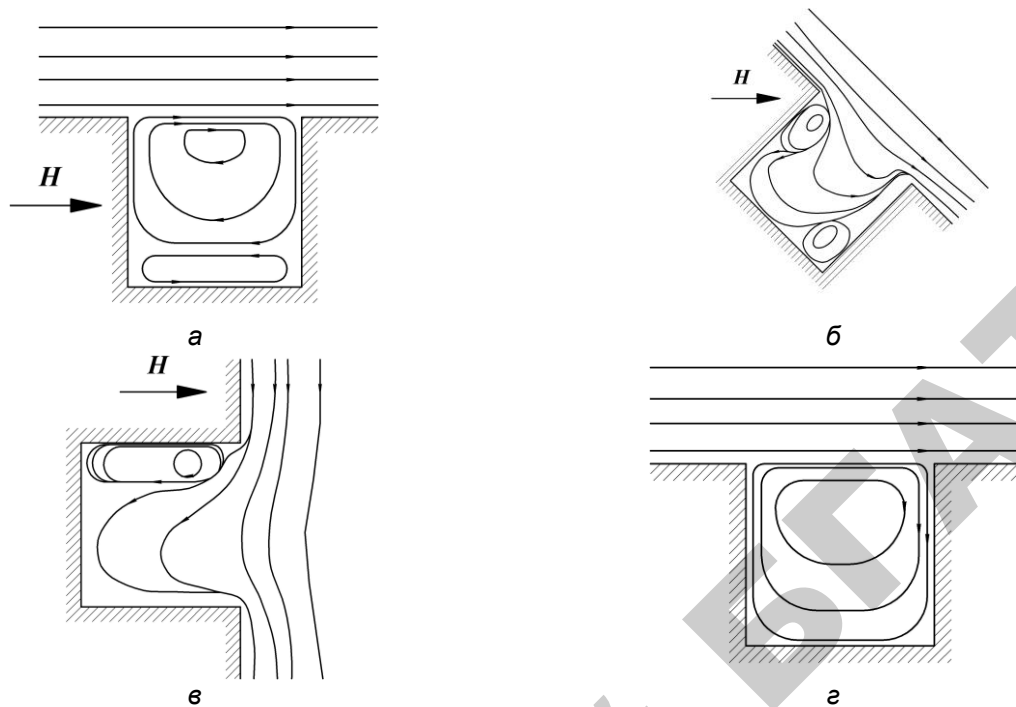


Рисунок 2. Линии тока СОТС при обтекании паза зубчатого колеса:
а – область I (рис. 4); б – область II (рис. 4); в – область III (рис. 4); г – без магнитного поля

зубчатого колеса (рис. 3) при наложении магнитного поля. При наложении поперечного магнитного поля (область I, рис. 3) зона вихря резко сокращается (рис. 2 а) и течение стремится к безотрывному. При $Re = 50$ и $N = 12$ отрыв потока, т. е. вихрь, при течении в поперечном поле не обнаруживается.

Совершенно иная картина наблюдается в продольном магнитном поле (область III, рис. 3). В этом случае вблизи дна образуется еще один вихрь с противоположным направлением (рис. 2 в). По мере возрастания поля размер этого вихря возрастает, и при $Re = 50$ и $N = 50$ этот вихрь занимает около половины паза.

Определенная картина течения получается, когда магнитное поле наклонено к оси паза под некоторым углом (область II, рис. 3). Течение в пазу ориентируется вдоль поля (рис. 2 б). Наблюдается также тен-

денция к безотрывности течения, хотя в правом углу образуются второй небольшой вихрь.

На основании вышеизложенного можно отметить, что для улучшения качества поверхности зубчатых колес при МАО целесообразно применять реверсивное движение детали, меняя несколько раз направление движения. Полученные расчеты показывают, что градиент давления, образуемый магнитной индукцией в зоне паза зубчатого колеса и определяемый давлением и типом потоков СОТС, направлен по ходу вращения обрабатываемой детали.

С целью проверки теоретических расчетов были проведены экспериментальные исследования по МАО зубчатого колеса ($m = 2,5$ мм, сталь 18ХГТ, 62...64 HRC в количестве 9 шт). Режимы обработки: частота вращения детали – $n = 12,5$ мин⁻¹; амплитуда осцилляции – $A = 2$ мм; скорость осцилляции – $V_o = 0,1$ м/с; зазор в рабочей зоне обработки – $\delta = 1$ мм; объем подаваемого порошка – $V_{пор} = 3,32 \times 10^{-3}$ дм³/с; магнитная индукция – $B = 1$ Т; время обработки $t = 2$ мин. Вращение осуществлялось по часовой стрелке и против часовой стрелки. ФАП – FeTiC ТУ 6-09-03-483-81; размер частиц – $\Delta = 100/160$ мкм; СОТС – СинМА-1 5% водный раствор. Измерение шероховатости производилось на профилографе-профилометре мод. 252 «Калибр».

Обработанные зубчатые колеса были разделены на 3 партии, каждая из которых обрабатывалась по часовой стрелке на 10 с дольше предыдущей. Шероховатость эвольвентной поверхности после МАО измеряли вдоль рабочих поверхностей в четырех точках.

Результаты исследований представлены на рисунке 4.

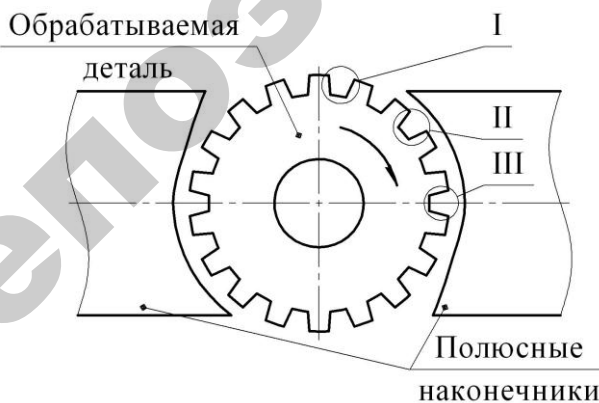


Рисунок 3. МАО зубчатого колеса

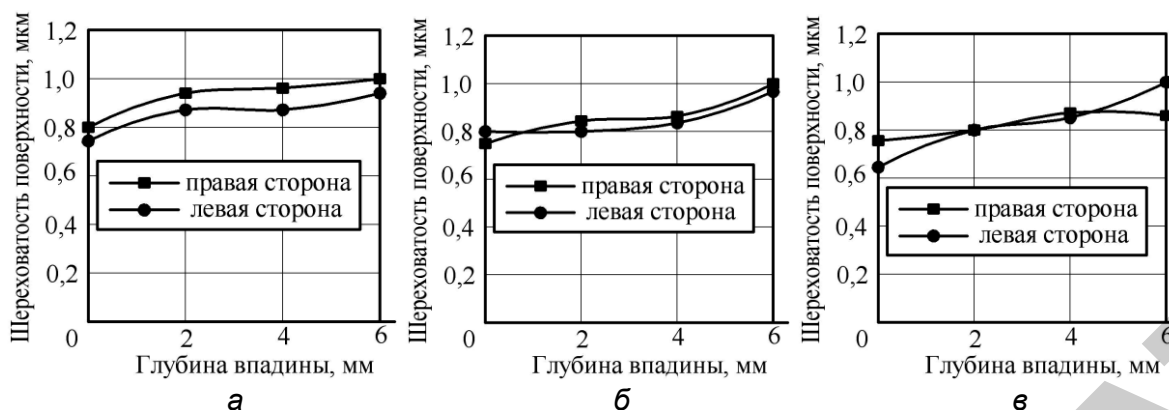


Рисунок 4. Зависимости изменения шероховатости по эвольвенте с разных сторон зуба после МАО: а – время обработки – 120 с против часовой стрелки, 10 с – по часовой; б – время обработки – 120 с против часовой стрелки, 20 с – по часовой; в – время обработки – 120 с против часовой стрелки, 30 с – по часовой

Заключение

Таким образом, для получения при МАО одинакового значения шероховатости с двух сторон эвольвентной поверхности зуба, целесообразно использовать реверсивное вращение детали, обеспечивающее равномерное распределение РТС на рабочие поверхности зуба. Цикл обработки детали необходимо выполнять в течение 120 с в одну сторону и 30 с – в обратную.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ящерицын, П.И. Работоспособность узлов трения машин / П.И. Ящерицын, Ю.В. Скорынин. – Мн.: Наука и техника, 1984. – 288 с.
2. Калашников, А.С. Современные методы чистой обработки зубчатых цилиндрических колес / А.С. Калашников // Оборудование и инструмент для профессионалов: металлообработка, 2009. – №6. – С. 38-42.
3. Обработка износостойких покрытий / Ж.А. Мрочек [и др.]; под общей ред. Ж.А. Мрочека. – Мн.: Дизайн ПРО, 1997. – 208 с.

4. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач: учеб. пос. / В.Е. Антонюк [и др.]; под общей ред. В.Е. Антонюка. – Мн.: Технопринт, 2003. – 766 с.

5. 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. – Мн., 2007. – 153 л.

6. Сергеев, Л.Е. Формирование характеристик поверхностного слоя деталей при магнитно-абразивной обработке отверстий / Л.Е. Сергеев, Н.Я. Скворчевский. – Мн.: физико-технический институт акад. наук Беларуси, Деп. ВИНТИ, 1993. – 10 с.

7. Брановер, Г.Г. Магнитная гидродинамика несжимаемых сред / Г.Г. Брановер, А.Б. Цинобер. – М.: Наука, 1970. – 380 с.

8. Домбровский, В.В. Справочное пособие по расчету электромагнитного поля в электрических машинах / В.В. Домбровский. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 18.05.2015

“Агропанорама” - научно-технический журнал для работников агропромышленного комплекса. Это издание для тех, кто стремится донести результаты своих исследований до широкого круга читателей, кого интересуют новые технологии, кто обладает практическим опытом решения задач.

Журнал “Агропанорама” включен в список изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим (сельскохозяйственное машиностроение и энергетика, технический сервис в АПК), экономическим (АПК) и сельскохозяйственным наукам (зоотехния).

Журнал выходит раз в два месяца, распространяется по подписке и в розницу в киоске БГАТУ. Подписной индекс в каталоге Республики Беларусь: для индивидуальных подписчиков - 74884, предприятий и организаций - 748842.

Стоимость подписки на 2-е полугодие 2015 года: для индивидуальных подписчиков - 111 900 руб., ведомственная подписка - 152 052 руб.