

# ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В АГРОИНЖЕНЕРНОЙ ОТРАСЛИ: ОПЫТ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ

---

УДК 621.923

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев, М.В. Дорошенко

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,  
Республика Беларусь, г. Минск,  
leo-akulovich@yandex.ru*

В сельскохозяйственном машиностроении на стадиях чистовой, тонкой и отделочной обработки поверхностей превалирует абразивная обработка. Характерным для абразивной обработки является наличие у частиц абразивного порошка отрицательных передних углов и скругленных вершин, что при высоких скоростях и малых глубинах резания вызывает интенсивное скольжение абразивных зерен по обрабатываемой поверхности. При обработке инструментами с жестким закреплением абразивных зерен (шлифовальные круги, бруски, ленты) по обрабатываемой поверхности также проскальзывает материал связки. Указанное воздействие инструмента на обрабатываемую поверхность совместно с деформацией материала заготовки силами резания приводит к резкому повышению температуры в поверхностных слоях обрабатываемых изделий, что вызывает фазовые и структурные превращения в зоне контакта абразивного инструмента с поверхностью детали и изменению физико-механических свойств материала поверхностных слоев, а также появлением дефектов. Основными видами дефектов обработки абразивным кругом, бруском или лентой являются прижоги, остаточные растягивающие напряжения, нарушение однородности структуры и увеличение размеров зерна материала, что способствует возникновению трещин и питтинга. Появление в результате обработки жестким абразивным инструментом прижогов и сопутствующих им дефектов поверхностного слоя материала детали обусловлено тепловой напряженностью в зоне контакта абразивного зерна и детали [1].

В незакрепленном состоянии зерна абразива наиболее полно реализуют свои режущие, деформирующие и выглаживающие способности в технологиях магнитно-абразивной обработки (МАО) [2]. Под действием магнитного поля частицы незакрепленного абразива ориентируются наибольшей осью перпендикулярно обрабатываемой поверхности. В результате незакрепленные абразивные зерна под действием магнитного поля по мере износа переориентируются в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности, а процесс микрорезания производится

постоянно обновляющимися острыми кромками. Для реализации MAO не требуется изготавливать профилирующий абразивный инструмент, а также периодически его править. Перспективными областями применения MAO в сельскохозяйственном машиностроении является отделочно-зачистная обработка цилиндрических и плоских поверхностей, очистка их от жировых отложений, удаление оксидных слоев, снятие заусенцев и округление кромок.

Особенность технологического процесса MAO заключается в отсутствии жесткого крепления абразивного зерна в связке, что устраняет вероятность появления в зоне микрорезания критических давлений и температур, что повышает стойкость абразивных зерен и физико-механических показателей качества обрабатываемого поверхностного слоя изделия. Предварительный расчет основных выходных параметров процесса MAO является необходимым условием осуществления проектирования, управления и промышленного использования технологии с учетом соблюдения условий повышения производительности и обеспечения заданных характеристик качества формируемого поверхностного слоя [2]. К настоящему времени разработана методика расчета теплового состояния при шлифовании плоскостей полимерно-абразивными щетками [3]. Однако отсутствуют данные о тепловом взаимодействии контактирующих объектов и методы количественной оценки тепловой напряженности при MAO листового проката. В связи с этим разработка метода аналитического расчета тепловых процессов MAO для оценки основных температурных закономерностей и выбора рациональных режимов данного метода является актуальной.

Для исследования тепловой напряженности рассмотрим традиционную схему финишной обработки плоской детали. Согласно данной схеме по поверхности детали перемещается вращающаяся ферроабразивная «щетка» в форме диска, при этом каждое зерно является локальным источником тепловыделения на поверхности контакта. Представим единый источник тепла, действующий непрерывно и перемещающийся по поверхности детали с постоянной скоростью, как совокупный результат элементарных тепловых потоков, активно участвующих в процессе обработки.

Вспользуемся выражением (1) для определения температурного поля в обрабатываемой детали в любой конкретный момент времени [3]:

$$T_{x, y, z, t} = 32 \cdot \frac{aQ}{\lambda B} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \gamma_k \frac{d}{2} \mu_k \cdot \cos \gamma_k x + hL \cdot \sin \gamma_k x}{\mu_k + h^2 L^2 + 2hH} \times$$

$$\times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \gamma_n \frac{b}{2} \left( \cos \gamma_n \cdot \left( \frac{b}{2} + Y1 \right) + \sin \gamma_n \cdot \left( \frac{b}{2} + Y1 \right) \right) \mu_n \cdot \cos \gamma_n \cdot y + hH \cdot \sin \gamma_n \cdot y}{\mu_n^2 + h^2 H^2 + 2hH} \times$$

$$\times \sum_{m=1}^{\infty} \frac{F_{knm}^1 t + F_{knm}^2 t \mu_m \cdot \cos \gamma_m \cdot z + h \cdot B \sin \gamma_m \cdot z}{a^2 + \gamma_{knm}^2 + \gamma_k^2 v^2 \mu_m^2 + h^2 B^2 + 2hB}. \quad (1)$$

Коэффициенты в формуле (1) определяли следующим образом:

$$\begin{aligned}
F_{knm}^1 t &= a\gamma_{knm}^2 \cos \gamma_k \cdot \left( \frac{d}{2} + vt \right) + \gamma_k v \cdot \sin \gamma_k \times \\
&\times \left( \frac{d}{2} + vt \right) - \left( a\gamma_{knm}^2 \cos \gamma_k \frac{d}{2} + \gamma_k v \cdot \sin \gamma_k \cdot \frac{d}{2} \right) e^{-a\gamma_{knm}^2 t}; \\
F_{knm}^2 t &= \frac{h}{\gamma_k} \left\{ \begin{aligned} &a\gamma_{knm}^2 \sin \gamma_k \cdot \left( \frac{d}{2} + vt \right) - \gamma_k v \cdot \cos \gamma_k \times \left( \frac{d}{2} + vt \right) - \\ &-\left( a\gamma_{knm}^2 \sin \gamma_k \frac{d}{2} - \gamma_k v \cdot \cos \gamma_k \cdot \frac{d}{2} \right) e^{-a\gamma_{knm}^2 t} \end{aligned} \right\},
\end{aligned} \tag{2}$$

где  $x, y, z$  – координаты температурного поля, м;  $t$  – конкретный момент времени, с;  $a$  – температуропроводность детали, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  – теплопроводность детали, Вт/(м·град);  $L, H, B$  – соответственно длина, ширина и высота детали, м;  $Q$  – плотность теплового потока, Вт / м<sup>2</sup>;  $b$  – ширина ферроабразивной «щетки», м;  $d$  – длина пятна контакта, м;  $Yl$  – расстояние от края детали до пятна контакта, м;  $v$  – продольная скорость перемещения, м/с;  $\alpha$  – коэффициент конвективного теплообмена на боковой и торцевых поверхностях, (Вт / м<sup>2</sup>·град);  $T_s$  – температура окружающей среды, град.;  $\mu_k, \mu_n, \mu_m$  – пространственные координаты длины, ширины и высоты соответственно, м;  $\gamma_k = \mu_k / L$ ;  $\gamma_n = \mu_n / H$ ;  $\gamma_m = \mu_m / B$ ;  $h = \alpha / \lambda$ , М<sup>-1</sup>;  $\gamma_{knm} = \gamma_k^2 + \gamma_n^2 + \gamma_m^2$ .

При расчете температурного поля приняты следующие допущения:

- рассматривается единый источник тепла как совокупный результат элементарных тепловых потоков, возникающих при резании множеством зерен, входящих в ферроабразивную «щетку»;

- единый источник тепла в процессе магнитно-абразивной обработки перемещается по поверхности детали с постоянной скоростью.

Численные решения выполняли при следующих режимах МАО: скорость резания  $V_p = 1,0 \dots 2,5$  м/с; величина рабочего зазора  $\delta = 2$  мм; продольная скорость перемещения  $v = 0,01 \dots 0,04$  м/с; габариты детали – ширина  $H = 30$  мм, длина  $L = 200$  мм, высота  $B = 15$  мм; материал – сталь 40 ГОСТ 1050-88, сталь Х12М ГОСТ 5950-2000, сплав Д16 ГОСТ 4784-97. Температура окружающего воздуха принята равной 20°С; коэффициент теплопроводности воздуха  $k = 0,0259$  Вт/(м·град); числа Грасгофа и Прандтля соответственно:  $Gr = 9500$  и  $Pr = 0,703$ ; коэффициент теплоотдачи с поверхности плоской детали  $\alpha \approx 6$  Вт/(м<sup>2</sup>·град).

Анализ расчетных зависимостей свидетельствует о снижении контактной температуры с ростом продольной скорости перемещения, обуславливающей уменьшение времени воздействия теплового источника. Наиболее высокие значения температуры характерны для стали Х12М. Максимальные значения температуры зафиксированы в зоне контакта инструмента с поверхностью детали. По мере удаления от зоны контакта температура в расчетных точках уменьшается. При температуре  $t = 20^\circ\text{C}$  возрастает скорость взаимодействия участков детали с источником тепла,

увеличивается теплоотвод от теплового источника, что приводит к снижению контактных температур.

Как показали проведенные исследования, применение МАО без охлаждения при  $V_p = 2,5$  м/с и  $\delta = 2$  мм с продольной скоростью перемещения  $v = 0,01$  м/с приводит к росту контактной температуры до  $t = 335^\circ\text{C}$  (сталь Х12М),  $t = 152^\circ\text{C}$  (сплав Д16),  $t = 191^\circ\text{C}$  (сталь 40). Увеличение продольной скорости перемещения в 4 раза ( $v = 0,04$  м/с) приводит к снижению значений температуры для стали Х12М в 1,19 раза ( $t = 282^\circ\text{C}$ ), для сплава Д16 в 1,39 раза ( $t = 109^\circ\text{C}$ ), для стали 40 в 1,31 раза ( $t = 146^\circ\text{C}$ ). Применение МАО с охлаждением в течение 1 минуты при  $V_p = 2,5$  м/с и  $\delta = 2$  мм с продольной скоростью перемещения  $v = 0,01$  м/с приводит к росту контактной температуры до  $t = 305^\circ\text{C}$  (сталь Х12М),  $t = 122^\circ\text{C}$  (сплав Д16),  $t = 178^\circ\text{C}$  (сталь 40). Увеличение продольной скорости перемещения в 4 раза ( $v = 0,04$  м/с) приводит к снижению значений температуры для стали Х12М в 1,27 раза ( $t = 240^\circ\text{C}$ ), для сплава Д16 в 1,49 раза ( $t = 82^\circ\text{C}$ ), для стали 40 в 1,38 раза ( $t = 129^\circ\text{C}$ ).

Изучение условий теплового взаимодействия при МАО позволяет осуществлять выбор технологических параметров обработки с учетом производительности процесса, стойкости инструмента и качества обрабатываемой поверхности. Предлагаемый метод позволяет проанализировать распределение температуры по сечению обрабатываемой детали в любой момент времени и построить изотермы температурных полей и градиентов температур с целью анализа возможных структурных превращений и расчета величин остаточных напряжений. С помощью аналитического расчета исследованы величина контактной температуры, глубина теплового воздействия и оценен температурный режим обработки с целью обеспечения безопасных температур поверхности детали и инструмента. Установлена связь между контактной температурой в зоне обработки, теплофизическими характеристиками образцов и кинематикой процесса. Рекомендуемый режим МАО, обеспечивающий минимальную температуру: скорость резания,  $V_p = 2,5$  м/с; величина рабочего зазора,  $\delta = 2$  мм; продольная скорость перемещения,  $v = 0,04$  м/с.

#### Список литературы

1. Якимов, А.В. Теплофизика механической обработки / А.В. Якимов, П.Т. Слободяник, А.В. Усов. – Киев-Одесса: Лыбидь, 1991. – 240 с.
2. Акулович, Л.М. Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей деталей сельскохозяйственных машин / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев. – Минск: БГАТУ, 2019. – 272 с.
3. Устинович, Д.Ф. Моделирование тепловых процессов при обработке плоских поверхностей полимерно-абразивными щетками / Д.Ф. Устинович, В.М. Голуб / Известия Национальной академии наук Беларуси, сер. физ.- техн. наук, 2012, №4. – С. 63-69.