

Терентьев // Сельский механизатор. – 2018. – № 2. – С. 8-9.

11. Андреев, К.П. Совершенствование рабочих органов самозагружающегося разбрасывателя удобрений / К.П. Андреев, А.В. Шемякин, В.В. Терентьев // В сборнике: Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве. Материалы Международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 199-201.

12. Андреев, К.П. Разработка и обоснование параметров рабочих органов самозагружающейся машины для поверхностного внесения твердых минеральных удобрений / К.П. Андреев, Н.В. Бышов, С.Н. Борычев, А.В. Шемякин, М.Ю. Костенко, В.В. Терентьев // Монография. Курск, – 2018.

13. Андреев, К.П. Силовое взаимодействие лопасти ворошителя со слоем удобрений / Андреев К.П., Костенко М.Ю., Шемякин А.В. // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 2. – С. 163-167.

14. Андреев, К.П. Работа самозагружающейся машины при внесении минеральных удобрений / К.П. Андреев, В.В. Терентьев, А.Д. Ерошкин // В сборнике: Молодежная наука – гарант инновационного развития АПК материалы X Всероссийской (национальной) научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2019. – С. 187-192.

## **УДК 621.9**

### **МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МОЛОЧНЫХ КАТЕТЕРОВ**

*Залуцкий Максим Александрович, студент-специалист  
Раймбеков Асылхан Аканович, студент-специалист  
Сергеев Леонид Ефимович, науч. рук., к.т.н., доцент  
Сенчуров Евгений Витальевич, науч. рук, нач. отдела внедрения  
НТР НИИМЭСХ, ст. преп.  
УО Белорусский ГАТУ, г. Минск, Республика Беларусь*

***Аннотация:** представлены результаты исследования параметров качества обработанной поверхности при магнитно-абразивной обработке (МАО). Определены аналитические зависимости для определения напряжённости электромагнитного поля. Разработан процесс МАО металлических молочных катетеров.*

***Ключевые слова:** мастит, молочный катетер, магнитно-абразивная обработка, абразивный порошок, шероховатость*

Мастит вымени у коров – одна из серьезных проблем современного молочного животноводства. Мастит наносит серьезный экономический ущерб всей сельскохозяйственной отрасли. Очень часто доение коровы

становится невозможным. Кроме того, молоко от больных животных вообще запрещено к употреблению. На отдельных фермах маститом могут болеть сразу до 35% животных [1]. По данным Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь на 2018 год было собрано около 15 млн. тонн молока, тогда если смоделировать ситуацию с маститом потери составят около 5 млн. тонн молока, что приведет к снижению рентабельности предприятий молочной промышленности [2].

Мастит у коров лечится с помощью антибактериальной терапии. Но лечение антибиотиками имело существенный недостаток: антибактериальные препараты имеют свойство накапливаться в клетках животного. Присутствие антибиотиков обнаруживается и в молоке, из-за чего оно становится непригодным для использования в пищевой промышленности. Альтернативным методом, способным эффективно осуществлять лечение мастита у коров, является внутрицистернальный с применением молочного катетера. Его назначение заключается в эвакуации молока из вымени или введении лекарственных препаратов. За счет своей формы он создает минимум дискомфорта для животного и легко извлекается, не требуя дополнительных усилий.

Металлический катетер (рисунок 1) изготавливают из нержавеющей стали (например, 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-2014) и используется многократно при условии стерилизации. На поверхности трубки катетера должны отсутствовать трещины, раковины, царапины, заусенцы, расслоения, прижоги и другие загрязнения типа окалин и следов смазки. Радиус притупления рабочих частей катетера должен составлять не менее 0,3 мм [3].



Рис. 1. Молочный катетер

В настоящее время имеет место тенденция создания и использования электрофизических и электрохимических методов обработки, среди которых особое место занимает магнитно-абразивная обработка (МАО) [4]. Однако проблема обработки методом МАО заключается в необходимости определения топографии электромагнитного поля (ЭМП) в зоне обработки по причине установления знака и места приложения сил резания, обусловленных напряженностью  $H$  этого поля, с целью повышения эффективности процесса размерного и массового съема материала. ЭМП в каждой точке пространства и в каждый момент времени характеризуется вектором его

напряженности, поскольку, оно рассматривается как самостоятельный материальный объект. В этих условиях грамотное конструктивное решение не должно полностью связываться с интуитивным подходом. Следует произвести строгий учет геометрии исследуемой области и на основании синтеза получить точное знание картины сил резания, определяемых вектором напряженности  $\vec{H}$ . Системный подход является базой для решения комплексной задачи проблемы интенсификации МАО металлических молочных катетеров в области формообразования и средств его реализации. Повышение эффективности операции МАО обеспечивается геометрическими и кинематическими методами оценки и реализации процесса съема материала при условии равномерности силового воздействия ферроабразивного порошка (ФАП) на обрабатываемую поверхность. Расчет и создание необходимой напряженности ЭМП, основанной на геометрическом и силовом изменении параметров МАО, необходимы для конструирования технологической оснастки и оборудования, обеспечивающих стабильность давления ФАП по всей площади обрабатываемой поверхности. Тожественность математического описания процесса МАО и его природы обеспечивает управление обрабатываемостью деталей из различных материалов и позволяет назначать режимы резания при учете структуры и марки материала изделия, его конфигурации и топологического пространства зоны обработки.

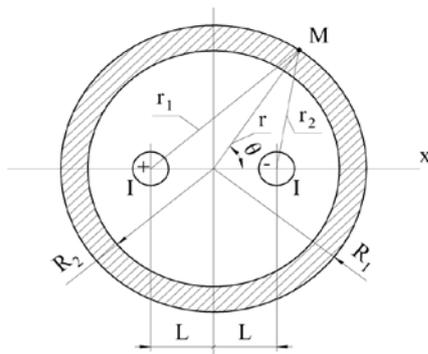


Рис. 2. Схема расчета магнитного поля

Расчет производился в системе цилиндрических координат, рисунок 2. Значение векторного потенциала ЭМП, связанного с током  $I$  в определенной точке  $M$ , находящейся на расстоянии  $r_1$  и  $r_2$  от осей проводников с током определяется по формуле (1) и осуществляется использованием метода наложения через выражение ротора  $\text{rot } \vec{A}$  в цилиндрических координатах [5].

$$A_z = -\frac{M_0 I}{2\pi} \ln \frac{r_1}{r_2} + C \quad (1)$$

Ротор ( $\text{rot } \vec{A}$ ) равен магнитной индукции  $\vec{B}$ , а сам векторный потенциал является векторной величиной, плавно изменяющейся от точки к точке при учете того, что его дивергенция  $\text{div } \vec{B} = 0$ . По причине возможности

нахождения  $\vec{A}$  как функции координат, индукция  $B$  в любой точке магнитного поля определяется путем нахождения ротора от  $\vec{A}$ . Преимуществом использования векторного потенциала служит то обстоятельство, что его применяют как для областей занятых, так и незанятых током.

Поскольку  $\vec{A}$  является расчетной функцией, имеющей пространственные производные и подчиняется условию того, что его линии есть замкнутые на себя ( $\text{div}A = 0$ ), то формула (1), как частный случай, позволяет определить векторный потенциал в любой точке ЭМП и имеет вид

$$\vec{A} = \frac{M_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{\delta} dV}{R}$$

где  $\vec{\delta}$  – плотность тока, А/м<sup>2</sup>;

$V$  – объем, м<sup>3</sup>;

$R$  – расстояние от точки приложения, м.

Оценка ЭМП для МАО указывает, что данная система носит вихревой характер по причине соленоидного типа его конструкции и, поэтому, из-за

$$\text{div}(\text{rot}A) = \nabla(\nabla\vec{A}),$$

где  $\nabla$  – дифференциальный оператор,

его скалярное произведение равно нулю, но ротор вектора  $B$  в целом ряде точек поля нулю не равен. Линии магнитной индукции непосредственно у поверхности детали имеют вид, близкий к окружностям с центром внутри этой детали. По мере удаления от нее эти линии искажаются, и для обработки методом МАО необходимо знать величины и направления  $\vec{B}$  на наружной поверхности детали, поскольку  $\vec{B}$  определяет силу резания и давление ФАП для реализации размерного и массового съема материала. Таким образом, в зоне обработки методом МАО существует ось ветвления, проходящая через точку  $M$  с координатами  $r = \frac{\mu_0 I}{2\pi B_{\text{ат}}}$  и  $\theta = 180^\circ$ , где  $B$  во

всех точках равно нулю, но в других точках на поверхности детали она нулю не равна, поскольку поле имеет вихревой характер. Следовательно, используя принцип того, что кривые  $A_z = \text{const}$ , линии магнитной индукции будут окружностями с центрами, лежащими на оси  $x$  и в любом месте пространства, где существует ток, имеется вихревое магнитное поле. Поэтому, согласно положению метода наложения, внутри этих окружностей помещается линия из двух проводников и расчет производится вышеуказанным методом для определения  $B$  в точке  $M$ , лежащей на наружной поверхности детали.

Двухпроводная линия при учете нахождения проводников на расстоянии  $2L$  расположена во внутреннем пространстве детали, имеющей наружный радиус  $R_1$  и внутренний радиус  $R_2$ .

Следовательно, логарифм в формуле (1) имеет четыре слагаемых

$$\ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^2 = \frac{1}{2} \left[ \ln \left( 1 - \frac{L}{r} e^{j\theta} \right) + \right. \\ \left. + \ln \left( 1 - \frac{L}{r} e^{-j\theta} \right) - \ln \left( 1 + \frac{L}{r} e^{j\theta} \right) - \ln \left( 1 + \frac{L}{r} e^{-j\theta} \right) \right],$$

и каждый из них разлагается в ряд. Члены рядов с четными степенями сокращаются и после  $e^{jK\theta} + e^{-jK\theta} = 2\cos K\theta$  следует:

$$\ln \frac{r_2}{r_1} = - \left[ \frac{L}{r} \cos \theta + \frac{1}{3} \left( \frac{L}{r} \right)^3 \cos(3\theta) + \frac{1}{5} \left( \frac{L}{r} \right)^5 \cos(5\theta) + \dots \right], \quad (r > L).$$

Этот ряд сходится при  $r > L$ , что соответствует размерной цепи детали и во внешней области по отношению к молочным катетерам в выражении векторного потенциала присутствуют члены, содержащие  $1/r^n$ , поскольку при  $r \rightarrow \infty$  значение  $A_z$  для внешней области обращается в ноль, что вытекает из формулы (1). Тогда

$$A_z = - \frac{M_0 I}{\pi} \sum \frac{P_n}{r^n} \cos n\theta \quad \text{при } (r \geq R_2; \quad n = 1, 3, 5, \dots).$$

В соответствии с выражением ротора в цилиндрических координатах магнитная индукция имеет  $B_r$  и  $B_\theta$  составляющие.

$$B_r = \frac{1}{r} \frac{dA_z}{d\theta} \quad \text{и} \quad B_\theta = - \frac{dA_z}{dr}$$

Поскольку, согласно приведенного расчета напряженности  $H$  на поверхности катетеров, ее наибольшее значение будет при  $\theta = 0$  или  $\theta = \pi$  и оно будет равно  $H = -2H_0$ , то основным условиями эффективности МАО этих катетеров служат кинематические и динамические показатели процесса.

Режимы и параметры МАО молочных катетеров, являются: магнитная индукция,  $B = 0,9$  Тл; частота осцилляции полюсных наконечников,  $n = 280$  дв.ход/мин; амплитуда осцилляции полюсных наконечников,  $A = 0,8$  мм; скорость резания,  $V_p = 2-3$  м/с; величина силы тока, подаваемого на катушки ЭМС,  $I = 5$  А; величина рабочего зазора,  $\delta = 1$  мм; коэффициент заполнения рабочего зазора,  $K = 1$ ; время обработки,  $t = 60$  с. В качестве ФАП использовался 100Ф5 ТУ 232-130-004-90 (рисунок 3), размерность,  $\Delta = 0,1-0,16$  мм; СОТС–СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, 5% водный раствор; расход СОТС – 200 мл/мин.

Исходные размеры металлических молочных катетеров  $D \times d = 3,3 \times 2,5$  мм,  $L = 50$  мм. Исходная шероховатость составляла  $Ra_1 = 0,6-0,8$  мкм. Величину магнитной индукции в рабочем зазоре ( $B$ , Тл) определяли тесламетром Т-3.

Результаты исследований: достигнутая шероховатость  $Ra_2 = 0,06$  мкм, величина массового съема материала  $\Delta G = 170$  мг, величина размерного съема материала  $\Delta D = 45$  мкм. Величину размерного съема ( $\Delta D$ , мкм) определяли на микроскопе Bevision M1, массового съема ( $\Delta G$ , мг) – на весах лабораторных ВЛТЭ-150, шероховатость поверхности до ( $Ra_1$ , мкм) и

после МАО ( $Ra_2$ , мкм) – на профилографе-профилометре мод. 252 «Калибр».

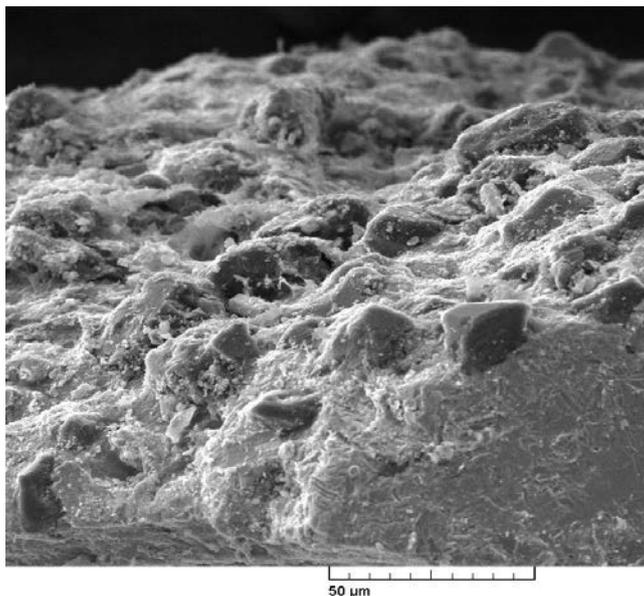


Рис. 3. Топография ферроабразивного зерна

В результате проведенных исследований установлены аналитические зависимости для определения величины напряженности ЭМП, что обеспечивает определение динамики процесса и степень силового воздействия на обрабатываемые детали. Экспериментально определены качественные показатели поверхностного слоя (шероховатость поверхности), величины массового и размерного съема материала, что позволило разработать технологию МАО металлических молочных катетеров.

#### Список литературы

1. Камышанов, А.С. Мастит у высокопродуктивных молочных коров в период лактации и их воспроизводительная функция: автореф. дис. ... канд. вет. наук / А.С. Камышанов. ФГОУ ВПО СГАУ, Саратов, 2005. – 32с.
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://aw.belal.by>
3. ГОСТ 19126-2007 Инструменты медицинские металлические. Общие технические условия; введ. 2008 – 01 – 01. – Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации; Москва: Стандартинформ, 2007. – 12с.
4. Акулович, Л.М. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей различного профиля Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. – Минск: БГАТУ, 2013. – 372 с.
5. Говорков, В.А. Электрические и магнитные поля / В. А. Говорков. – Москва: Энергия, 1968. – 328с.