

МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МОЛОЧНЫХ КАТЕТЕРОВ

Л.М. Акулович,

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

Л.Е. Сергеев,

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

С.И. Мендалиева,

сотрудник АО «Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина», канд. техн. наук

Е.В. Сенчуров,

начальник отдела внедрения НТР НИИМЭСХ БГАТУ

М.А. Залуцкий,

студент факультета технического сервиса БГАТУ

Представлены результаты исследования параметров качества поверхности катетеров при магнитно-абразивной обработке (МАО). Установлены аналитические зависимости для определения напряженности электромагнитного поля. Определены технологические параметры МАО молочных катетеров.

Ключевые слова: мастит, молочный катетер, магнитно-абразивная обработка, ферроабразивный порошок, шероховатость.

The results of a study of the surface quality parameters of catheters during magnetic abrasive treatment (MAT) are presented. Analytical dependencies for determining the electromagnetic field strength are established. The technological parameters of MAT milk catheters are determined.

Keywords: mastitis, milk catheter, magnetic abrasive treatment, abrasive powder, roughness.

Введение

Заболевание маститом вымени – одна из серьезных проблем современного молочного животноводства. Дояние коровы с таким заболеванием становится невозможным. Кроме того, молоко от больных животных вообще запрещено к употреблению. На отдельных фермах маститом могут болеть сразу до 35 % животных [1]. Мастит наносит серьезный экономический ущерб всей сельскохозяйственной отрасли. По данным Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, за 2018 год было собрано около 15 млн тонн молока, и если смоделировать ситуацию с маститом, то потери могут составлять около 5 млн тонн молока, что приведет к снижению рентабельности предприятий молочной промышленности [2].

Цель настоящей работы – исследование технологических возможностей процесса магнитно-абразивной обработки (МАО) тонкостенных полых изделий на примере металлического молочного катетера.

Основная часть

Мастит у коров лечится с помощью антибактериальной терапии, но лечение антибиотиками имеет существенный недостаток: антибактериальные препараты имеют свойство накапливаться в клетках жи-

вотного. 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 внутримаститеральный метод, с применением молочного катетера [3]. 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 (рис. 1) изготавливают из нержавеющей стали (например, 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-2014), он используется многократно, при условии стерилизации. Исходные размеры металлических молочных катетеров – $D \times d = 3,3 \times 2,5$ мм, $L = 50$ мм. На поверхности трубки катетера должны отсутствовать трещины, раковины, царапины, заусенцы, расслоения, прижоги и другие загрязнения типа окалин и следов смазки. Радиус скругления рабочих кромок катетера должен составлять не менее 0,3 мм [4], а шероховатость поверхности по параметру Ra – не более 0,63 – 0,80 мкм. Это требование должно быть обеспечено при изготовлении катетера с применением соответствующих методов и технологий обработки.

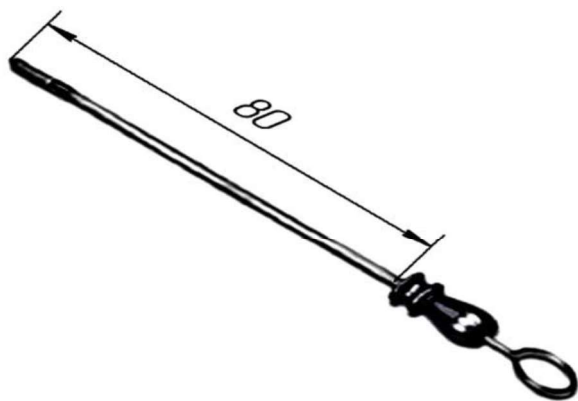


Рисунок 1. Молочный катетер

В настоящее время наиболее перспективными являются электрофизические и электрохимические методы обработки, среди которых особое место занимает магнитно-абразивная обработка [5]. Проблема обработки полых поверхностей вращения методом МАО заключается в необходимости определения топографии электромагнитного поля (ЭМП) в зоне обработки обусловленных напряженностью H этого поля, обеспечивающей наибольшие величины сил резания, место их приложения и эффективный съем неровностей на обрабатываемой поверхности. 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. 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. Тождественность 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. Расчет производился в системе цилиндрических координат (рис. 2).

Значение векторного потенциала ЭМП \vec{A} , связанного с током I в определенной точке M , находящейся на расстоянии r_1 и r_2 от осей проводников с током, осуществляется с использованием метода наложения через выражение ротора $\text{rot } \vec{A}$ в цилиндрических координатах [6] и определяется по формуле:

$$A_z = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} + C \quad (1)$$

где A_z – осевая составляющая векторного потенциала ЭМП, Вб/м;

μ_0 – магнитная проницаемость снаружи детали, Гн/м;

I – сила тока в проводниках, А;

C – постоянная, Вб/м.

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 $\text{div } B = 0$. 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

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{\delta} dV}{r}, \quad (2)$$

где $\vec{\delta}$ – плотность тока, А/м²;

V – объем, м³;

r – расстояние от точки приложения до оси детали, м.

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 реали-

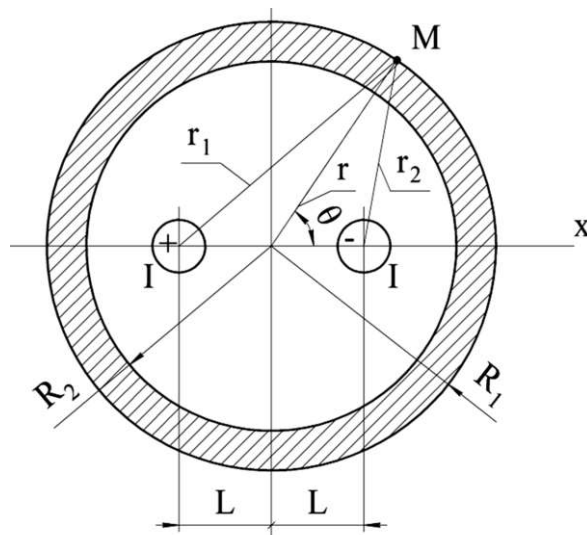


Рисунок 2. Схема расчета магнитного поля

зации размерного и массового съема материала. Таким образом, в зоне обработки методом MAO существует ось ветвления, проходящая через точку M с координатами $r = \frac{\mu_0 I}{2\pi B}$ и $\theta = 180^\circ$, где B во всех точ-

ках 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.

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

$$\ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 = \frac{1}{2} \left[\ln \left(1 - \frac{L}{r} e^{j\theta} \right) + \ln \left(1 - \frac{L}{r} e^{-j\theta} \right) - \ln \left(1 + \frac{L}{r} e^{j\theta} \right) - \ln \left(1 + \frac{L}{r} e^{-j\theta} \right) \right], \quad (3)$$

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:

$$\ln \frac{r_2}{r_1} = - \left[\frac{L}{r} \cos \theta + \frac{1}{3} \left(\frac{L}{r} \right)^3 \cos(3\theta) + \frac{1}{5} \left(\frac{L}{r} \right)^5 \cos(5\theta) + \dots \right], \quad (r > L). \quad (4)$$

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

$$A_z = - \frac{\mu_0 I}{\pi} \sum \frac{P_n}{r^n} \cos n\theta \quad \text{при } (r \geq R_1; \quad n = 1, 3, 5, \dots). \quad (5)$$

где P_n – постоянные коэффициенты для внешней области.

В соответствии с выражением ротора в цилиндрических координатах магнитная индукция имеет B_r и B_θ составляющие.

$$B_r = - \frac{1}{r} \frac{dA_z}{d\theta} \quad \text{и} \quad B_\theta = - \frac{dA_z}{dr}. \quad (6)$$

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

Однако 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 MAO металлических молочных катетеров в области формообразования и средств его реализации. Для понимания процессов, происходящих при MAO, и расширения ее технологических возможностей, требуется исследование пространственного распределения ЭМП и, соответственно, его топографии. Для правильного выбора конструкции и размеров полюсных наконечников и самой электромагнитной системы (ЭМС), а также определения оптимального расположения обрабатываемых изделий следует произвести топографическое исследование ЭМП и магнитной индукции в рабочем зазоре. Для решения этой задачи самым доступным и эффективным способом является компьютерное моделирование, состоящее в численном решении системы уравнений Максвелла при заданных граничных условиях. В последнее время широкое распространение получают программные комплексы, позволяющие оптимизировать процессы применения численного решения уравнений Максвелла. Одним из вариантов совершенствования расчета ЭМС является применение метода конечных элементов для моделирования ЭМП [7]. Программный комплекс Femm используется для реализации сокращения разработки конфигурации межполюсного пространства и получения эффективного алгоритма компьютерного моделирования ЭМП [8]. В результате применения комплекса Femm было проведено модельное исследование пространственного распределения магнитной индукции в рабочем зазоре и выявлено, что ее показатели имеют различные значения, которые носят локальный характер.

Сопоставляя результаты компьютерного моделирования и использования программного комплекса Femm, можно сделать вывод о том, что они корреляционно согласуются с полученными теоретическими и экспериментальными данными. Распределение магнитной индукции и соответственно наибольшая концентрация ФАП осуществляется количественно на горизонтальной оси изделия при наличии образования зон на границах полюсных наконечников, препятствующих выбору ФАП (рис. 3).

В ходе исследований получены следующие результаты: достигнутая шероховатость $Ra_2 = 0,1$ мкм; величина массового съема материала $\Delta G = 170$ мг; величина размерного съема материала $\Delta D = 45$ мкм. Величину размерного съема (ΔD , мкм) определяли на микроскопе Bevision M1, массового съема (ΔG , мг) – на весах лабораторных ВЛТЭ-150, шероховатость поверхности до (Ra_1 , мкм) и после MAO (Ra_2 , мкм) – на профилографе-профилометре мод. 252 «Калибр».

Режимы и параметры MAO молочных катетеров: магнитная индукция, $B = 0,9$ Тл; частота осцилляции

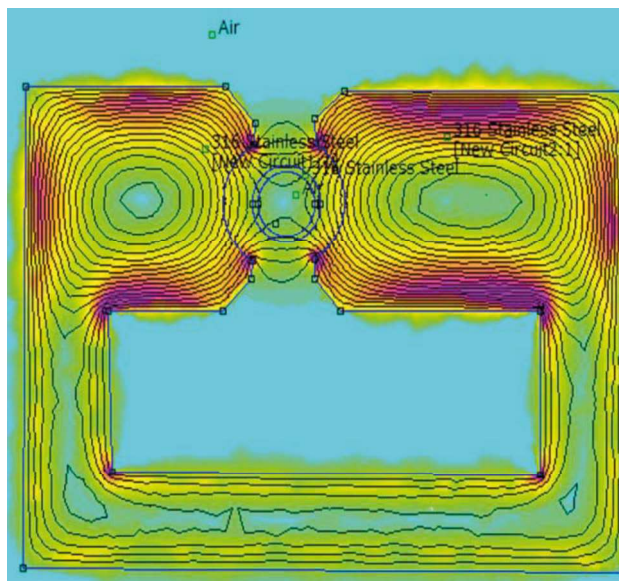


Рисунок 3. Топография магнитного поля, определенная методом компьютерного моделирования

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, $K_z = 1$; время обработки, $t = 60$ с. В качестве ФАП использовался 100Ф5 ТУ 232-130-004-90 (рис. 4), размерность зерен, $\Delta = 0,1-0,16$ мм; смазочно-охлаждающее технологическое средство (СОТС) – СинМА-1 ТУ 38.5901176-91, 5 %-й водный раствор; расход СОТС – 200 мл/мин.

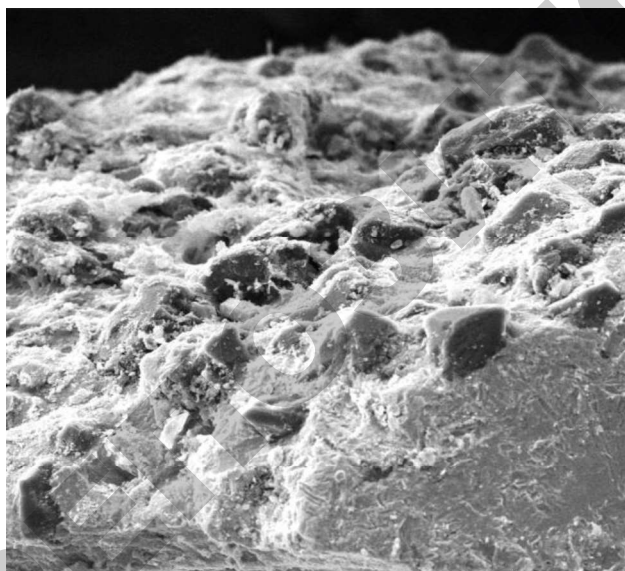


Рисунок 4. Микрорельеф ферроабразивного зерна

Исходная шероховатость составляла $Ra_1 = 0,6-0,8$ мкм. Величину магнитной индукции в рабочем зазоре (B , Тл) определяли тесламетром Т-3.

Заключение

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 ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Камышанов, А.С. Мастит у высокопродуктивных молочных коров в период лактации и их воспроизводительная функция: автореф. дис. ... канд. вет. наук: 16.00.07 / А.С. Камышанов. – Саратов: ФГОУ ВПО СГАУ, 2005. – 32 с.
2. AgroWeb Беларусь – национальный сайт-навигатор [Электронный ресурс] / Белорусская сельскохозяйственная библиотека. – Минск, 2020. – Режим доступа: <http://aw.belal.by/russian/belal.htm>. – Дата доступа: 03.04.2020.
3. Ветеринарная фармакология / И.Н. Николаенко [и др.]. – Минск: Вышэйшая школа, 2013. – 410 с.
4. Инструменты медицинские металлические. Общие технические условия: ГОСТ 19126-2007. – Введ. 01.01.2008. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2008. – 19 с.
5. Акулович, Л.М. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей различного профиля / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев. – Минск: БГАТУ, 2013. – 372 с.
6. Говорков, В.А. Электрические и магнитные поля / В.А. Говорков. – М.: Энергия, 1968. – 328 с.
7. Галлагер, Р. Методы конечных элементов / Р. Галлагер. – М.: Мир, 1984. – 428 с.
8. Finite Element Method Magnetics [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <http://www.femm.info/wiki/homepage>. – Дата доступа: 30.03.2020.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 03.04.2020