

УДК 663.915

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗНОСА ФЕРРОЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТООЖИЖЕННОГО СЛОЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕХАНОАКТИВАТОРОВ

Беззубцева М.М., Смелик В.А., Волков В.С.

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», Санкт-Петербург,
e-mail: mysnegana@mail.ru

В статье представлены результаты исследований износа (эффекта намола) поверхностного слоя размольных ферроэлементов магнитоожигенного слоя электромагнитных механоактиваторов (ЭММА). В результате моделирования контактных силовых взаимодействий между размольными ферроэлементами и частицами обрабатываемого продукта выявлен механизм и установлены закономерности эффекта намола. На основании теории трения и износа с учетом ударно-истирающего способа измельчения материала в магнитоожигенном слое ЭММА и сравнительного анализа механических свойств частиц перерабатываемого продукта со свойствами материала размольных органов аппарата установлены критерии возникновения и развития эффекта намола. Критерии позволяют определить характер преобладающих в зоне контакта деформаций и установить границы перехода от упругого деформирования к пластическому и от пластического к микрорезанию. Критерии прогнозирования эффекта намола целесообразно использовать при проектировании ЭММА.

Ключевые слова: износ, магнитоожигенный слой, размольные элементы, критерии прогнозирования

THE STUDY OF WEAR PATTERNS OF FERROMAGNETIC PARTICLES WITHIN MAGNETIC LIQUEFIED LAYER OF ELECTROMAGNETIC MECHANICAL ACTIVATORS

Bezzubceva M.M., Smelik V.A., Volkov V.S.

St.-Peterburg agrarian university, St.-Peterburg, e-mail: mysnegana@mail.ru

The article includes results of research which reveals the wear (effect of size reduction) of a superficial layer of grinding ferromagnetic elements within magnetic liquefied layer of electromagnetic mechanical activators (EMMA). The modeling of contact force interactions between grinding ferromagnetic elements and particles of processed product allowed to reveal the mechanism and find out patterns connected with effect of size reduction. There are criteria for the emergence and development of effect of size reduction which is based on theory of friction and wear in view of shock-abrasive grinding method of the material in magnetic liquefied layer of EMMA. The criteria permits to determine a character of deformations prevailing in the contact zone and the boundaries of the transition from elastic to plastic deformation and from plastic to microcutting. This predictive criteria are suitable in the case of designing the EMMA.

Keywords: wear, magnetic liquefied layer, grinding elements, predictive criteria

Одним из показателей, характеризующих качество работы электромагнитных механоактиваторов (ЭММА) [1, 3, 4], является содержание в обработанном продукте примесей, внесенных в него в процессе износа (намола) ферромагнитных размольных элементов. Энергонапряженный характер силового взаимодействия ферроэлементов в их магнитоожигенном слое [6, 7, 8] предопределяет возможность развития эффекта намола как самих размольных элементов, так и поверхностей, ограничивающих рабочий объем механоактиваторов [8, 9, 10]. Исход силового взаимодействия в контактной системе шар–частица – шар (ш–ч–ш) при формировании диспергирующих нагрузок электромагнитным способом зависит от механических свойств контактирующих тел, которые характеризуются величинами σ и H_B (соответственно условное напряжение при разрушении частиц продукта и твердость материала размольных элементов).

В системе ш–ч–ш под действием внешней нагрузки (сил электромагнитного поля) наблюдается внедрение более твердых поверхностей в менее твердое контртело, что вызывает в последнем деформации (упругие, пластические, упруго-пластические), микрорезание поверхностного слоя или разрушение. Возникновение и развитие эффекта намола можно оценить на стадии проектирования режимно-конструктивных параметров ЭММА [2] на основании результатов исследований физико-механических процессов в магнитоожигенном слое ферротел.

Целью данной работы является теоретическое обоснование критериев прогнозирования эффекта износа (намола) ферромагнитных размольных элементов в магнитоожигенном слое электромагнитных механоактиваторов при диспергировании продуктов с различными физико-механическими свойствами.

Материалы и методы исследования

Предметом исследований являются физико-механические процессы, происходящие в магнитоожигенном слое ЭММА при контактном силовом взаимодействии ферромагнитных размольных элементов через прослойку перерабатываемого продукта.

Результаты исследования и их обсуждение

При оценке прочности частиц обрабатываемого продукта предельные напряжения определены делением разрушающей нагрузки на максимальную площадь поперечного сечения частицы. Определение границы между понятием «твердая – мягкая» частица ориентировочно можно произвести при помощи критерия твердости: $K_{ТВ} = \frac{HB}{\sigma_n}$, позволяющего априори оценить способности частицы вызывать прямое разрушение материала ферротел (при условии, что геометрия зоны контакта и приложенная сила обеспечивают совершение этого процесса). Согласно исследованиям [4, 7, 8] критические значения $K_{ТВ}$ находятся в диапазоне 0,5...0,7. При $K_{ТВ} < 0,5$ частица измельчаемого продукта способна выдерживать сравнительно большие нагрузки до разрушения и, следовательно, сохранять форму и способность создавать высокий уровень контактных напряжений, что предопределяет интенсивное прямое разрушение микрообъемов поверхностного слоя материала ферротел магнитоожигенного слоя ЭММА и обуславливает значительные потери энергии на совершение этого процесса. При $K_{ТВ} \gg 0,7$ снижаются значения контактных напряжений и интенсивность изнашивания материала. При повышении твердости обрабатываемого продукта и при росте нормальной нагрузки под действием сил электромагнитного поля процесс намолла обусловлен внедрением частиц в поверхностный слой материала размольных органов с отделением частиц износа.

С целью установления границы перехода к условиям развития эффекта намолла и определения критических значений твердости частиц, вызывающих износ рабочих органов ЭММА, рассмотрим механизм формирования предельных деформаций в микрообъеме поверхностного слоя материала ферротел при взаимодействии этого слоя с «твердой» измельчаемой частицей, моделируемой сферой с объемным радиусом $r_v \ll R_0$ (где R_0 – радиус взаимодействующих феррошаров). По мере втягивания «твердой» частицы в зону контакта, сила, действующая на частицу, постоянно возрастает, способствуя ее внедрению во взаимодействующие поверхности размольных

органов. При этом частица деформирует материал поверхности феррошаров сначала упруго, затем упруго-пластически и пластически до тех пор, пока не достигнет глубины внедрения h_b , соответствующей ее разрушению h_p . В зоне контакта начинают проявляться пластические деформации в том случае, когда до разрушения частица способна внедриться в поверхность ферротел на глубину:

$$h_b \approx 2,4 (1 - \mu_n^2)^2 \left(\frac{HB}{E_v} \right)^2 r_v, \quad (1)$$

что соответствует контурному давлению

$$p_c \approx \frac{5,4 HB^2 (1 - \mu_n^2)^4}{\Delta^2 E_v}, \quad (2)$$

где μ_n – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости; HB – твердость; Δ – параметр шероховатости; μ_n , E_v , HB – механические характеристики материала ферротел.

Начиная с контурных давлений, превышающих значения, вычисленных по формуле (2), увеличивается зона пластических деформаций при одновременном сокращении упругой зоны. Переход в область пластических деформаций осуществляется при глубине внедрения твердой частицы и контурных давлениях в системе:

$$h_b = 5,4 (1 - \mu_n^2)^2 \left(\frac{HB}{E_v} \right)^2 r_v, \quad (3)$$

$$p_c = \frac{14,5 HB^5 (1 - \mu_n^2)^4}{\Delta^2 E_v^4}.$$

Пластические деформации в слое «скольжения»

$$N_{nn} = \pi r_v h_b HB \quad (4)$$

обусловлены нагрузкой в зонах контакта:

$$N_{nn} = 17 r_v^2 (1 - \mu_n^2) \frac{HB^3}{E_v^2}. \quad (5)$$

Применительно к процессу измельчения материалов электромагнитным способом, характеризующимся многократными энергонапряженными производственными контактами в системе ш – ч – ш, превышение контурных давлений и нагрузок в системе выше значений, вычисленных по формулам (3) и (5), приводит к пластическому деформированию микрообъемов поверхностного слоя феррошаров. В этом случае создаются условия для протекания процесса намолла в результате усталостного изнашивания, возникающего вследствие многократных воздействий твердых частиц. При наличии касательных сил, образующихся

в результате переориентации феррошаров в структурных группах с созданием «слоя скольжения», в зоне контакта возникают касательные напряжения τ_n , обусловленные межатомными и межмолекулярными взаимодействиями. Согласно теории внешнего трения при наличии смазки внедрение частицы h_B в поверхностный слой материала ферротел зависит от величины нормальной силы и касательных напряжений τ_n . В зависимости от консистенции обрабатываемого продукта (или в зависимости от условия смазывания трущихся поверхностей), в зоне контакта может развиваться контурное давление: $p_c \approx \frac{0,125HB}{\Delta^2} \left(1 - \frac{6\tau_n}{HB}\right)^2$, вызывающее нарушение условий внешнего трения. При $\tau_n \rightarrow \frac{\sigma_n}{2} \approx \frac{HB}{6}$ контурное давление $p_c \rightarrow 0$, т.е. внешнее трение не осуществимо. В данном случае частица способна вызвать прямое разрушение поверхности размоленных органов при условии однократного контактного силового взаимодействия в системе ш – ч – ш.

Из анализа представленных формул следует, что в зависимости от величины безразмерной характеристики $\frac{h_B}{r_q}$ микрообъемы контактируемых поверхностей могут претерпевать упругую, упруго-пластическую, пластическую деформации либо микрорезание. Введение критериев перехода: $\left(\frac{h_B}{r_q}\right)_{y-n}$ – критерий перехода от упругой деформации к пластической и $\left(\frac{h_B}{r_q}\right)_{n-m}$ – критерий перехода от пластической деформации к микрорезанию, позволяет на основании их анализа оценить характер преобладающих деформаций и выявить условия протекания процесса диспергирования продуктов электромагнитным способом без сопутствующего ему процесса износа рабочих органов.

Полагая максимальную глубину внедрения h_{Bmax} , на которую может внедриться твердая частица в материал поверхности, равную глубине внедрения, соответствующей разрушению частицы h_p , безразмерную характеристику $\frac{h_B}{r_q}$ можно представить в виде

$$\frac{h_{Bmax}}{r_q} = \frac{h_p}{r_q}.$$

Разрушение частицы наступает при равенстве $N_r = N_M$ (здесь N_r – нормальное на-

пряжение, приведенное к диаметальному сечению частицы, вызывающее их разрушение; N_M – нагрузка, действующая со стороны материала на внедряющуюся частицу). С учетом условия втягивания частицы в зону контакта феррошаров $d \gg r_q$ при определении сил, действующих на частицу, можно считать, что она взаимодействует в каждой произвольной точке с плоскими поверхностями. В этом случае формулы для вычисления нагрузок N_M и N_r имеют вид:

$$N_M = 2\pi r_q h_{Bmax} HB, \quad (6)$$

$$N_r = \sigma_n \pi r_q. \quad (7)$$

С учетом равенства $h_B = h_{Bmax} = h_p$, к моменту разрушения частицы продукта можно записать:

$$2\pi r_q h_{Bmax} HB = \sigma_n \pi r_q^2$$

или

$$\left(\frac{h_B}{r_q}\right)_{\max} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_n}{HB}. \quad (8)$$

Следовательно, максимальную величину правомерно выразить через механические характеристики измельчаемых частиц и материала (σ_n и HB). Аналитическая оценка уравнения (8) может указать на характер преобладающих в системе ш – ч – ш деформаций, вызывающих процесс намолта размоленных органов аппарата.

При выполнении условия

$$\left(\frac{h_B}{r_q}\right)_{\max} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_n}{HB}\right) < \left(\frac{h_B}{r_q}\right)_{n-M}, \quad (9)$$

частица, моделируемая сферой, разрушается раньше, чем достигает глубины внедрения, необходимой для осуществления процесса прямого разрушения материала ферротел. В уравнении (9) отношение – это критерий перехода от пластических деформаций к микрорезанию.

Согласно теории внешнего трения твердых тел в условиях смазывания, что соответствует условиям силового взаимодействия обрабатываемого продукта с поверхностью размоленных органов, отношение касательных напряжений, обусловленных межатомными и межмолекулярными взаимодействиями, к твердости поверхностных слоев взаимодействующих элементов $\frac{\tau_n}{HB} < 0,1$.

Тогда нарушение условий внешнего трения произойдет при значении $\left(\frac{h_B}{r_q}\right)_{n-M} \approx 0,2$.

В этом случае на частицу будет действовать сила $N_M \approx 0,4 \pi r_q^2 HB$.

Из анализа характера преобладающих деформаций по условиям (8) и (9) или из сравнительного анализа значений силы N_M (6) с нормальным напряжением N_r (7), приведенным к диаметральному сечению частиц и вызывающим их разрушение, следует, что нарушение условий внешнего трения и переход к интенсивному изнашиванию ферроэлементов ЭММА произойдет при поверхностной твердости $HB = 2,5\sigma_n$. В диапазоне нагрузок, определяемых по формулам (5) и (3), микрообъемы поверхностного слоя ферротел будут испытывать пластические деформации, сопутствующие развитию процесса усталостного намола. При этом соотношение механических свойств материала поверхностного слоя ферротел и продукта, подлежащего обработке, определяется выражениями:

$$\left(\frac{h_B}{r_q}\right)_{y-n} < \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_n}{HB}\right) < \left(\frac{h_B}{r_q}\right)_{n-M}, \quad (10)$$

$$10^{-3} \dots 10^{-4} < \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_n}{HB}\right) < 0,2. \quad (11)$$

При выполнении неравенства (11) создаются условия для разрушения поверхности ферротел в результате многократных воздействий твердых частиц продукта. При этом частицы износа отделяются вследствие усталостного процесса изнашивания размольных органов аппарата. Так как интенсивность изнашивания при пластических деформациях на несколько порядков больше, чем при упругих, то при реализации процесса измельчения продуктов электромагнитным способом для случаев, когда процесс намола недопустим или регламентирован стандартом, в системе ш – ч – ш необходимо создавать нормальные нагрузки (и соответствующие им контурные давления), не превышающие значения, вычисленные по формулам (2), (3), (5). При выполнении условия

$$\left(\frac{h_B}{r_q}\right)_{\max} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_n}{HB}\right) < \left(\frac{h_B}{r_q}\right)_{y-n} \approx 10^{-3} \dots 10^{-4} \quad (12)$$

частица обрабатываемого продукта создает до момента ее разрушения в материале поверхностного слоя ферротел только упругие деформации, что снижает вероятность возникновения и развития процесса намола размольных органов аппарата.

Заключение

В результате исследований физико-механических процессов, происходящих в магнитоожигенном слое ЭММА при контактном силовом взаимодействии ферромагнитных размольных элементов через прослойку перерабатываемого материала,

получены соотношения (критерии), позволяющие прогнозировать возникновение и развитие в процессе измельчения продуктов сопутствующего ему процесса намола. Критерии прогнозирования эффекта намола целесообразно использовать при проектировании ЭММА.

Список литературы

1. Беззубцева М.М., Волков В.С., Обухов К.Н., Котов А.В. Энергетическая теория способа формирования диспергирующих нагрузок в электромагнитных механоактиваторах // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 12–6. – С. 1157–1161.
2. Беззубцева М.М., Волков В.С. Рекомендации по проектированию электромагнитных механоактиваторов // *Международный журнал экспериментального образования*. – 2014. – № 5–2. – С. 128–129.
3. Беззубцева М.М., Ружьев В.А., Волков В.С. Теоретические исследования деформированного магнитного поля в рабочем объеме электромагнитных механоактиваторов с магнитоожигенным слоем размольных элементов цилиндрической формы // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 6–4. – С. 689–693.
4. Беззубцева М.М., Волков В.С., Котов А.В., Обухов К.Н. Определение сил и моментов, действующих на систему ферромагнитных размольных элементов цилиндрической формы в магнитоожигенном слое рабочего объема электромагнитных механоактиваторов // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 11–3. – С. 504–508.
5. Беззубцева М.М., Волков В.С. Исследование физико-механических процессов в магнитоожигенном слое феррочастиц // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 1–1. – С. 13–17.
6. Беззубцева М.М., Ружьев В.А., Загаевски Н.Н. Формирование диспергирующих нагрузок в магнитоожигенном слое электромагнитных механоактиваторов // *Современные наукоемкие технологии*. – 2014. – № 10. – С. 78–80.
7. Беззубцева М.М., Волков В.С. К вопросу расчета энергии рабочего процесса в электромагнитных механоактиваторах (ЭММА) // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2012. – № 7. – С. 129–130.
8. Беззубцева М.М. К вопросу исследования эффекта намола в аппаратах с магнитоожигенным слоем ферротел // *Международный журнал экспериментального образования*. – 2014. – № 8. – С. 96.
9. Беззубцева М.М., Зубков В.В. Прогнозирование эффекта намола измельчающего оборудования // *Современные наукоемкие технологии*. – 2013. – № 6. – С. 145–146.
10. Беззубцева М.М., Ружьев В.А., Романейн Н.В. Экспериментальные исследования процесса намола в электромагнитных механоактиваторах // *Успехи современного естествознания*. – 2014. – № 11 (часть 3). – С. 122–123.
11. Трение, изнашивание и смазка: Справочник / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.

References

1. Bezzubceva M.M., Volkov V.S., Obuhov K.N., Kotov A.V. Jenergeticheskaja teorija sposoba formirovanija dispergirujushih nagruzok v jelektromagnitnyh mehanoaktivatorah // *Fundamentalnye issledovaniya*. 2014. no. 12–6. pp. 1157–1161.
2. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Rekomendacii po proektirovaniju jelektromagnitnyh mehanoaktivatorov // *Mezhdunarodnyj zhurnal jeksperimentalnogo obrazovaniya*. 2014. no. 5–2. pp. 128–129.
3. Bezzubceva M.M., Ruzhev V.A., Volkov V.S. Teoreticheskie issledovaniya deformirovannogo magnitnogo polja v rabochem obeme jelektromagnitnyh mehanoaktivatorov s magnitoozhizhen-

nym sloem razmolnyh jelementov cilindricheskoj formy // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 6–4. pp. 689–693.

4. Bezzubceva M.M., Volkov V.S., Kotov A.V., Obuhov K.N. Opredelenie sil i momentov, dejstvujushhих na sistemu ferromagnitnyh razmolnyh jelementov cilindricheskoj formy v magnitoozhizhennom sloe rabocheho obema jelektromagnitnyh mehanoaktivatorov // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 11–3. pp. 504–508.

5. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. Issledovanie fiziko-mehaničeskikh processov v magnitoozhizhennom sloe ferrochastic // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 1–1. pp. 13–17.

6. Bezzubceva M.M., Ruzhev V.A., Zagaevski N.N. Formirovanie dispergirujushhих nagruzok v magnitoozhizhennom sloe jelektromagnitnyh mehanoaktivatorov // Sovremennye naukoemkie tehnologii. 2014. no. 10. pp. 78–80.

7. Bezzubceva M.M., Volkov V.S. K voprosu rasčeta jenergetiki rabocheho processa v jelektromagnitnyh mehanoaktivatorah (JeMMA) // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamentalnyh issledovanij. 2012. no. 7. pp. 129–130.

8. Bezzubceva M.M. K voprosu issledovanija jeffekta namola v apparatah s magnitoozhizhennym sloem ferrotel // Mezhdunarodnyj zhurnal jeksperimentalnogo obrazovanija. 2014. no. 8. pp. 96.

9. Bezzubceva M.M., Zubkov V.V. Prognozirovanie jeffekta namola izmelchajushhego oborudovanija // Sovremennye naukoemkie tehnologii. 2013. no. 6. pp. 145–146.

10. Bezzubceva M.M., Ruzhev V.A., Romanejn N.V. Jeksperimentalnye issledovanija processa namola v jelektromagnitnyh mehanoaktivatorah // Uspehi sovremennogo estestvoznaniya. 2014. no. 11 (chast 3). pp. 122–123.

11. Trenie, iznashivanie i smazka: Spravochnik / Pod red. I.V. Kragelskogo, V.V. Alisina. M.: Mashinostroenie, 1978. 400 p.

Рецензенты:

Салова Т.Ю., д.т.н., профессор кафедры «Энергообеспечение предприятий» СПбГАУ, руководитель ведущей научной и научно-педагогической школы СПб «Системы, узлы и агрегаты двигателей», г. Санкт-Петербург;

Елифанов А.П., д.т.н., профессор кафедры «Электроэнергетика и электрооборудование», ИТССЭ, г. Санкт-Петербург.