

## Азотирование молотков зерновой дробилки птицефабрики

В.М. Юров<sup>1</sup>, К.М. Маханов<sup>1</sup>, А.К. Салькеева<sup>2</sup>, А.С. Кусенова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Карагандинский университет имени Е.А. Букетова,  
Караганда, Казахстан, exciton@list.ru  
<sup>1</sup>Карагандинский технический университет,  
Караганда, Казахстан

***Аннотация.** В настоящей работе упрочнение молотков зерновой дробилки осуществлялось с использованием низкоэнергетического облучения в атмосфере азота. На основе использования ионно-плазменного азотирования можно сделать вывод, что дополнительная бомбардировка газовыми ионами позволяет кардинально изменять структуру конденсата путем его поверхностного упрочнения.*

***Ключевые слова:** упрочнение, облучение, азотирование, поверхность.*

### **Введение**

Процесс приготовления комбикормов сопряжен с рядом операций по переработке сырьевых ингредиентов. На качество комбикормов влияет режим измельчения сырьевых ресурсов. Это самая энергоемкая и трудоемкая операция, регламентируемая требованиями ГОСТ и зоотехническими рекомендациями, и по среднестатистическим данным составляет порядка 60% от общих затрат труда в заготовке и приготовлении кормов [1]. При измельчении комбикормов нужно добиться равномерного состава гранул измельченного сырья, который оказывает влияние на его качество.

В комбикормовой промышленности и хозяйствах основной измельчающей машиной является молотковая дробилка. Она проста по устройству и не предъявляет высоких требований к эксплуатации (рис. 1), но при измельчении в ней компонентов комбикорма получают продукт, в котором имеются недоизмельченные частицы и значительное содержание пылевидной фракции. Несмотря на простоту молотковая дробилка не в полной мере удовлетворяет возросшим современным требованиям к энергоэффективности и качеству готовой продукции, получаемой в процессе измельчения [2-4] (смотри диссертации [1-4] и библиографию в них).

В основном, молотковые дробилки применяют к материалам, имеющим малый или средний запас прочности. Липкие и вязкие материалы молотковая дробилка не перерабатывает. При всех своих достоинствах, молотковые дробилки имеют ряд недостатков:

1. Высокая степень износа дробильных молотков (дробление абразивов повышает вероятность преждевременного износа).
2. Износ колосниковых решеток при обработке веществ с влажностью более 15 процентов.

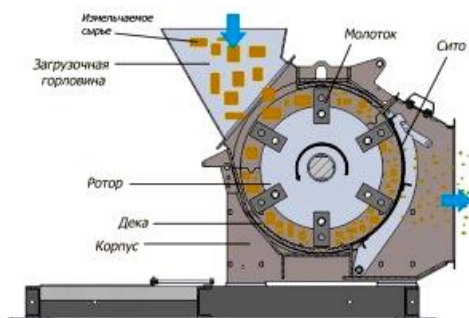


Рисунок 1 - Молотковая дробилка [1]

3. При случайной загрузке в аппарат материалов, полностью не подвергающихся дроблению, возможно повреждение основных узлов и агрегатов молотковой дробилки.

Для продления срока службы молотков дробилки необходимо их упрочнение. Этому посвящено огромное число работ, среди которых мы отметим некоторые из них [5, 6]. Фабрика Акнар использует молотки дробилки, изготовленные из стали марки ст-3. Упрочнение этих сталей производится, в основном, методом азотирования [7, 8]. Анализ современной литературы показал, что ионное азотирование является одним из наиболее распространенных методов поверхностного упрочнения деталей и инструмента, использование которого в промышленно развитых странах постоянно расширяется взамен различных способов химико-термической обработки инструмента, которая экологически вредная.

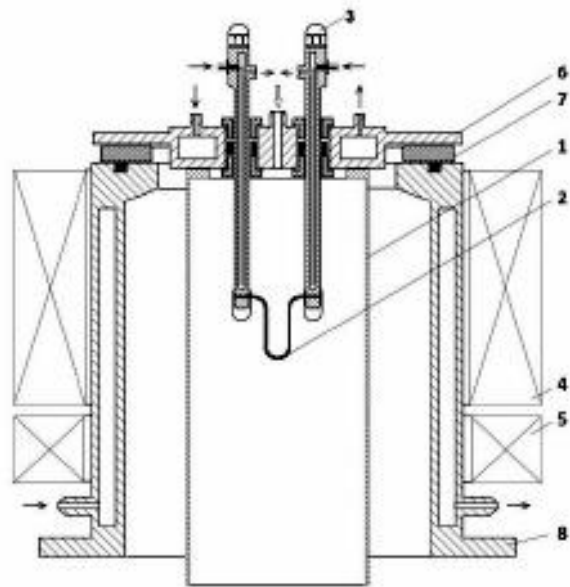
#### **Методика эксперимента**

В качестве источника газовой плазмы применялся плазменный источник «ПИНК» с комбинированным накаливаемым и полым катодом [9], разработанный в лаборатории плазменной эмиссионной электроники (ЛПЭЭ) ИСЭ СО РАН (рис. 2). Генератор плазмы «ПИНК» расположен на верхнем фланце камеры ННВ-6.6И1. Источник газовой плазмы «ПИНК» представляет собой плазменный источник на основе несамостоятельного дугового разряда с комбинированным накаливаемым и полым катодом. На фланце 6 смонтированы два водоохлаждаемых электроввода 3 для питания прямонакального катода 2. Цилиндрический экраный электрод 1 диаметром 90 мм и длиной 350 мм закреплен на вакуумной стороне фланца 6. Катод выполнен из вольфрамовой проволоки длиной 125 мм и толщиной 1,5 мм. Питание накала обеспечивается трансформатором с регулировкой переменного (50 Гц) напряжения по его первичной обмотке. Электрическое питание разряда осуществляется от источника напряжения, включающего в себя трехфазные трансформатор и выпрямитель. Плазменный источник изолирован от корпуса установки и находится под плавающим потенциалом.

Газ в источник газовой плазмы подается через газоввод на фланце 6 от системы напуска газа, включающей два регулятора расхода газа РРГ-10.



*a*



*б*

1 – катодная полость; 2 – нагретый вольфрамовый катод; 3 – электроввод; 4 – стабилизирующая катушка; 5 – фокусирующая катушка; 6 – водоохлаждаемый фланец; 7 – изолятор; 8 – водоохлаждаемый корпус.

Рисунок 2 - Внешний вид (а) и принципиальная схема (б) плазменного источника «ПИНК» [9].

Источник газовой плазмы «ПИНК» [9, 10] работает по следующему принципу. После подачи газа, стабилизации давления в камере и создании в рабочем объеме плазмогенератора продольного магнитного поля с магнитной индукцией  $B = 0,1-3$  мТл включается накал катода и подается напряжение на электроды разрядной системы. Электроны, эмитируемые термокатодом, ускоряются в направлении к дополнительному электроду, который в момент зажигания разряда выполняет роль вспомогательного анода, и ионизируют газ в катодной полости, тем самым провоцируя зажигание разряда в промежутке нагретый катод-поджигающий электрод. При этом полый катод заполняется плазмой, которая распространяется в вакуумную камеру. Это приводит к переключению горения разряда на основной анод (внутренние стенки вакуумной камеры), т.е. происходит зажигание основного несамостоятельного дугового разряда. Под действием внешнего магнитного поля траектория электронов, эмитированных с нагретого катода, искривляется. Движение электронов происходит по цилиндрической спирали, что увеличивает их путь к аноду, тем самым приводя к увеличению эффективности ионизации газа.

Изменяя ток накала, следовательно, и эмиссию электронов с термо катода, можно легко регулировать ток разряда от десятков до сотен ампер при напряжении горения в несколько десятков вольт. Такой разряд классифицируется как несамостоятельный дуговой разряд с нагретым катодом без катодного пятна. Данный дуговой разряд позволяет генерировать низкотемпературную плазму в объемах ( $\geq 0,1$  м<sup>3</sup>) с концентрацией  $n_e \sim 10^9-10^{11}$  см<sup>-3</sup> и однородностью  $\pm 15$  % от среднего значения.

Технологический режим процесса азотирования молотков дробилки представлен ниже.

Предварительная подготовка:

1. Обезжиривание молотков Нефрасом С2-80/120 (рис. 3 а).
2. Очистка и полировка в ванне установки электролитно-плазменной полировки ЭПП-40 (рис. 3 б), при следующих параметрах: состав раствора для полировки -5% водный раствор сульфата аммония; температура раствора- 85<sup>0</sup> С; напряжение катод-анод 300В, ток 40А; длительность обработки 5 мин.
3. После выгрузки из ванны ЭПП-40, молотки промываются проточной водой и обрабатывается паром при помощи пароструйного устройства УПС 4.3-гейзер (рис. 3 в).
4. После пароструйной очистки молотки протираются бязью смоченной спиртом и помещаются в сушильный шкаф с целью сушки и предварительного прогрева до 150<sup>0</sup>С.



а)



б)



в)

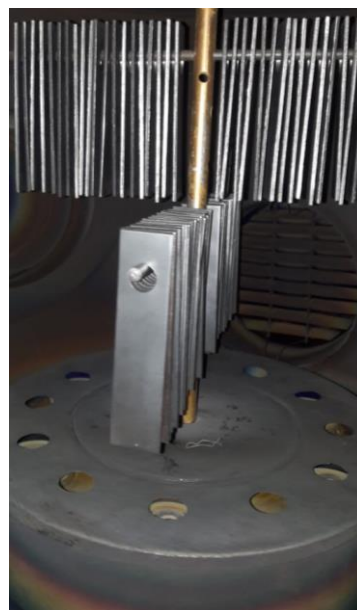
Рисунок 3 - Обезжиривание молотков Нефрасом С2-80/120 (а), полировка в ванне установки ЭПП-40 (б), пароструйное устройство УПС 4.3-гейзер (в)

Процесс ионно-плазменного азотирования:

1. Подготовленные молотки устанавливаются в вакуумную камеру установки ННВ 6.6-И1 (рис. 4 а) при помощи специальной оснастки в центр вращающегося стола (рис. 4 б).
2. Производится форвакуумная откачка камеры установки до давления 1Па (время около 15мин.).
3. Дальнейшая откачка камеры производится высоковакуумным диффузионным насосом до давления  $5 \cdot 10^{-3}$  Па. (время 20-25 мин.).
4. Затем в камеру через натекаль газа производится напуск аргона и с помощью блока управления электромагнитным натекалем « БУЭН» поддерживается давление в камере  $2 \cdot 10^{-1}$  Па.
5. Для проведения процесса ионной очистки и нагрева включается плазменный источник с накалимым катодом ПИНК , устанавливается ток накала 120 А и ионный ток 5А.
6. Включается блок опорного напряжения и на детали подается напряжение смещения -1000В. Для исключения образования микродуг на деталях, блок опорного напряжения работает в импульсном режиме с частотой 25 кГц и скважностью 80%.
7. Включается привод вращения стола и устанавливается скорость вращения 5 об/мин.



а)



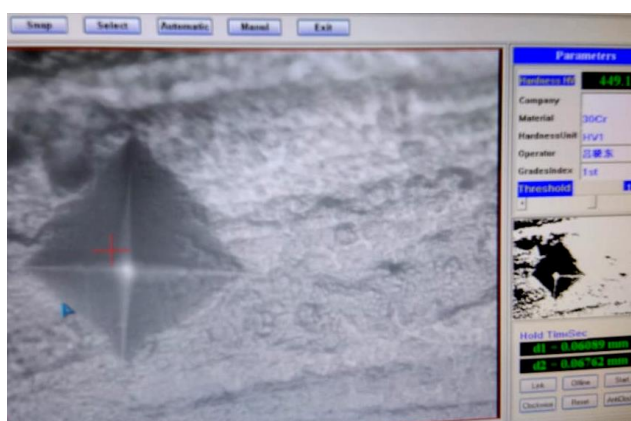
б)

Рисунок 4 - Вакуумная камера установки ННВ 6.6-И1 (а), специальная оснастка в центр вращающегося стола (б).

8. В течении 5-7 минут ионный ток ПИНК плавно доводится до 45-50 А, при этом производится контроль нагрева молотков при помощи пирометра «Смотрич 7» сфокусированного на детали через смотровое окно камеры.

9. При достижении температуры 450 °С (время 20-25 мин.) в камеру по параллельной газовой магистрали напускается азот особой чистоты, при помощи расходомера РРГ-10 (расход азота устанавливается 2 л/мин.) давление при этом БУЭН-ом поддерживается на уровне  $1,8-2,2 \cdot 10^{-1}$  Па. Таким образом, устанавливается режим ионно-плазменного азотирования деталей в аргоно-азотной смеси газов. В дальнейшем на протяжении всего процесса контролируется температура изделий, при необходимости корректировки которой, регулируется ток ПИНК и опорное напряжение. Процесс азотирования длится 3 часа, после чего изделиям дают остыть в вакуумной камере в течение часа и производят выгрузку.

Результаты замеров микротвердости поверхности молотков на микротвердомере HV-1000 при нагрузке на индентор 1 кг дали следующие результаты: до азотирования около 150 HV, после около 450 HV (рис. 5).





а)

б)

Рисунок 5 - Микротвердость поверхности молотков до (а) и после (б) азотирования

Таким образом увеличив твердость поверхности молотков можно существенно продлить межсервисный интервал молотковой дробилки.

### Обсуждение результатов эксперимента

Ассистирование ПИНК показывает, что структуру покрытия можно изменить, используя ионную бомбардировку. На рис. 6 показано изображение покрытия TiN после облучения азотом.

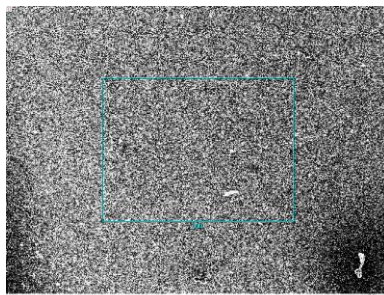


Рисунок 6 - Электронно-микроскопическое изображение покрытия TiN после ионной бомбардировки молотка

Одним из перспективных методов ассистирования процесса синтеза покрытий является низкоэнергетическое ионное облучение [11-13], в ходе которого не происходит существенного изменения системы покрытие/подложка, но появляется возможность регулирования структурно-фазового и элементного состава покрытий и их свойств.

В [13] показано, что одновременное с напылением титана облучение ионами азота, во-первых, исключает формирование высокоэнергетических нано- и субмикроструктур с высокой кривизной кристаллической решетки и высокой плотностью частичных дисклинаций в границах зерен и связанных с этим высоких локальных напряжений, и во-вторых, оно стимулирует эпитаксиальный механизм формирования нитридной фазы на подложке  $\gamma$ -аустенита, и в-третьих, приводит к повышению пластичности нитридного покрытия (от 3 до 6 %).

Плазменное ассистирование можно использовать при вакуумно-дуговом осаждении покрытий, которое является одним из этапов комплексной обработки сталей [14-16], включающей предварительное ионное азотирование поверхности и последующее нанесение TiN покрытия в едином технологическом цикле. Такая комбинированная обработка стали 40X позволяет формировать в поверхностном слое нитрид ( $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N) и обеспечивает градиентное снижение твердости по глубине образца. Это обеспечивает повышение адгезии TiN покрытия к стальной подложке и существенное увеличение износостойкости полученной композиции.

В [16] показаны эксперименты по осаждению TiN покрытий вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом при токе газового плазмодогенератора 10–12 А и токе дугового испарителя 50–100 А, в которых изучалось влияние отрицательного напряжения смещения на формирование

ионно-плазменных покрытий, а его значение составляло 15, 200, 600 и 1000 В. Установлено, что при плазменно-ассистированном нанесении покрытия напряжение смещения, прикладываемое к образцу, имеет определяющее значение в изменении структуры и фазового состояния в процессе формирования слоя. Исследования показали, что при малых отрицательных значениях напряжения смещения формируется пластинчатая структура с высоким уровнем упругих полей напряжения. Увеличение смещения приводит к формированию в пластинах наноразмерной поликристаллической структуры в результате разбиения на отдельные разориентированные кристаллиты. Оптимальным напряжением смещения оказывается  $U_{см} = -200$  В. Предполагается, что модификация структуры и свойств TiN, осажденных в условиях вакуумно-дугового распыления титана при облучении низкоэнергетическими ионами азота, обусловлена развитием релаксационных процессов вследствие ионного миксинга, генерации точечных дефектов и повышения диффузионной подвижности адатомов на поверхности растущего покрытия.

Результаты замеров микротвердости поверхности молотков на микротвердомере HV-1000 при нагрузке на индентор 1 кг дали следующие результаты: до азотирования около 150 HV, после азотирования около 450 HV, после напыления TiN около 900 HV.

#### **Заключение.**

Ионное азотирование (3 часа) с помощью плазменного источника «ПИНК» с комбинированным накаливаемым и полым катодом взамен химико-термической обработки молотков дробилки (10-14 часов) увеличивает ресурс их работы в 3 раза. Это приводит к повышению энергоэффективности дробилок и увеличению ресурса измельчения зерновых. Напыление молотков покрытием из нитрида титана приводит к упрочнению молотков в 6 раз, но стоимость покрытия TiN гораздо больше ионного азотирования и может применяться в отдельных случаях.

**Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РК. Гранты №0118РК000063 и №Ф.0781.**

#### Литература

1. Палкин А.В. Повышение эффективности функционирования молотковой безрешетной дробилки кормов: дис. канд. техн. наук. - Киров, 2000. - 160 с.
2. Рыбалкин Д.А. Повышение эффективности процесса измельчения лузги крупяных и масличных культур путем модернизации молотковой дробилки: дис. канд. техн. наук. – Саратов, 2018. – 160 с.
3. Лопатин Л.А. Повышение эффективности процесса измельчения зерна путем совершенствования рабочих органов молотковой дробилки: дис. канд. техн. наук. - Киров, 2018. - 185 с.
4. Миронов К.Е. Повышение эффективности процесса измельчения зерна с обоснованием параметров рабочих органов дробилки ударно-отражательного действия: дис. канд. техн. наук. - Княгинино, 2018. - 142 с.

5. Ялпачик Ф.Е., Ялпачик Г.С., Крыжачковский Н.Л., Кюрчев В.Н. Кормодробилки: конструкция, расчет. – Запорожье «Коммунар», 1992. – 292 с.
6. Чудина О.В., Гладова Г.В. Выбор материалов и методов упрочнения деталей транспортного машиностроения. - М.: МАДИ, 2015. - 120 с.
7. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г. Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – 518 с.
8. Рамазанов К.Н. Исследование структурно-фазовых превращений и свойств поверхностных слоев сталей при ионном азотировании в тлеющем разряде низкого давления: дис. доктора техн. наук. - Уфа, 2015. - 332 с.
9. Григорьев С.В., Коваль Н.Н., Толкачев В.С. и др. Дуговые разряды низкого давления с полым катодом и их применение в генераторах плазмы и источниках заряженных частиц // Изв. вузов. Физика. – 2001. – Т. 44. – № 9. – С. 28–35.
10. Коростелева Е.Н., Прибытков Г.А., Гурских А.В. Исследование структуры и свойств спеченных материалов титан–медь // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – Спецвыпуск. – Ч. 2. – С. 75–77.
11. Борисов Д.П., Щанин П.М., Коваль Н.Н. Генерация объемной плазмы дуговым разрядом с накаливаемым катодом // Изв. ВУЗов. Физика. 1994, Т. 37, № 3. - С. 115-121.
12. Винтизенко Л.Г., Григорьев С.В., Коваль Н.Н., Толкачев В.С., Лопатин И.В., Щанин П.М. Дуговые разряды низкого давления с полым катодом и их применение в генераторах плазмы и источниках заряженных частиц. // Известия ВУЗов. Физика. 2001, Т. 44, № 9. - С. 28-35.
13. Тюменцев А.Н., Коротаев А.Д., Пинжин Ю.П. и др. Влияние низкоэнергетического ионного облучения на микроструктуру покрытий нитрида титана. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 1998, № 10. - С. 92-100.
14. Goncharenko I.M., Grigoriev S.V., Lopatin I.V. et al. Surface modification of steels by complex diffusion saturation in low pressure arc discharge. // Surface and Coatings Technology, 2003, V. 169-170. - P. 419-423.
15. Borisov D.P., Goncharenko I.M., Koval N.N., Schanin P.M. Plasma-assisted deposition of a three-layer structure by vacuum and gas arcs. // IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, V. 26, № 6. - P. 1680-1684.
16. Гончаренко И.М. Комплексное модифицирование сталей и покрытий TiN в плазме дуговых разрядов низкого давления: дис. канд. техн. наук. - Томск, 2004. - 168 с.