На правах рукописи

ЛАВРИНОВИЧ ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПЯТИВАЛЬЦОВЫХ МЕЛЬНИЦ КОНДИТЕРСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Специальность 05.02.13. – Машины, агрегаты и процессы
(пищевая промышленность)

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2005

Работа выполнена на кафедре «Технология металлов и пищевое машиностроение» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет пищевых производств».

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор
Чувахин Сергей Владимирович

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
Денисов Валерий Иванович

Кандидат технических наук, доцент
Моляров Валерий Георгиевич

Ведущая организация: **ОАО «Кондитерский Концерн «Бабаевский»**

Защита состоится «16» июня 2005 г. в 13^{00} час. на заседании Диссертационного Совета Д 212.148.05 в Государственном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет пищевых производств» по адресу: г. Москва, Волоколамское ш., 11., ауд 302

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просим направлять по адресу: 125080, Москва, Волоколамское ш., 11, ГОУВПО МГУПП ученому секретарю Диссертационного Совета Д 212.148.05.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО МГУПП
Автореферат разослан «12» мая 2005 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
к.т.н , проф. А.С. Максимов

2006-4
14102

2175408

AUSBLICK

Das Thema der Dissertation lautet ***"Steigerung der Lebensdauer von Betriebsorganen (Werkteilen) der Fünfwalzwerken bei der Süßwarenproduktion"***.

Ziel dieser Untersuchung – Steigerung der Lebensdauer von Walzen der Fünfwalzwerke in der Süßwarenproduktion, um die nachhaltige Qualität der feingewalzten halbfertigen Produkte zu sichern.

Demensprechend wurden folgende Aufgaben gelöst:

- theoretische Begründung und Feststellung der Parameter von Kurven (Profilen) Walzenarbeitsfläche;
- PC-gesteuerte Modellierung der Veränderung von Walzenprofilen sog. „Balligkeit" während Abnutzung der Walzen;
- Erarbeitung eines theoretischen Models und Berechnung des Walzenverschleißes anhand dieses Models;
- Feststellung der Kriterien von Walzenverschleiß und –abnutzung; Erarbeitung einer Technologie zur Wiederherstellung deren Arbeitsfläche und Herausgabe von Empfehlungen.

Die wichtigste erzielte Ergebnisse

1. Es wurde die Methodik für das Begutachten des Walzzustand erarbeitet und die Wege der Steigerung der Walzenlebensdauer gefunden.
2. Es wurde die Methodik und die analytische Gleichung zur Beschreibung von Walzdurchbiegung während deren Betribsführung erarbeitet.
3. Es wurde ein Abrechungsmodell vorgeschlagen, das die Leistung der Maschine berücksigtigt und Abriebwirkung, mechanische Eigenschaften der Materialen, kinematische und geometrische Walzparameter beinhaltet.
4. Es wurde ein PC-Programm des Profilendarstellen von Walzen erarbeitet.
5. Es wurden die Struktur, chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften der Walzen untersucht.
6. Experimentell wurde die Zusammensetzung und die Konzentration von Abriebanteil in der Schokoladenmasse vor und nach dem Feinwalzen bestimmt.
7. Die vorgeschlagenen theoretischen Modelle wurden erfolgreich experimentell am Beispiel der Fünfwalzwerken von den Firmen "Carle & Montanari SpA" und "Petzholdt Heidenauer GmbH" bewiesen.

Die grundprinzipien dieser Untersuchung sind schon in die Konditoreiwarenproduktion und in den Unterrichtsprozess eingeführt.

РОС. НАЦИОНАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА
С.Петербург
ОД 3005 акт 352

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Обеспечение стабильности функционирования перерабатывающих предприятий АПК в условиях рынка и постоянного роста конкуренции является основной задачей отрасли. Ее выполнение определяется сочетанием высокого уровня качества продукции с минимальными затратами при ее производстве, в том числе на приобретение и ремонт технологического оборудования.

Характерной особенностью современных высокопроизводительных пищевых производств является повышение рабочих скоростей машин, в связи с чем увеличивается нагрузка на детали и рабочие органы машин, и, соответственно. скорость их изнашивания.

В пищевой промышленности, в частности кондитерской, наиболее изнашиваемыми являются рабочие органы измельчающего оборудования (вальцы многовальцовых мельниц, молотки и сита молотковых дробилок, штифты дезинтеграторов и дисмембраторов, шарики шариковых мельниц и др.). При контакте с измельчаемым сырьем или полуфабрикатом происходит попадание в него продуктов износа, изменяя конфигурацию рабочего органа. Это приводит к изменению гранулометрического состава измельчаемого материала, что в конечном итоге влияет на качество продукции.

В настоящее время проблемы изнашивания и пути восстановления рабочих органов шариковых, штифтовых, мельниц и молотковых дробилок кондитерского производства достаточно хорошо изучены Найдены отечественные аналоги материалов, из которых они выполнены, освоено их изготовление. В то время как исследования изнашивания рабочих органов (вальцов) пятивальцовых мельниц в достаточном объеме не проводились.

Опыт эксплуатации пятивальцовых мельниц показывает, что при выработке рабочего ресурса вальцов, ввиду неравномерности износа их рабочих поверхностей, снижается степень измельчения полуфабриката и однородность

его гранулометрического состава, что приводит к необходимости повторного вальцевания, а, следовательно, к падению производительности мельницы.

Повышение долговечности и стабильность формы рабочей поверхности вальцов пятивальцовых мельниц является одной из основных предпосылок к получению полуфабриката необходимого качества.

Пятивальцовая мельница импортное оборудование, и расходы на замену и закупку его запасных частей значительны. Поэтому разработка технологии восстановления работоспособности вальцов является актуальной научной и конструкторско-технологической задачей, решение которой позволит существенно снизить расходы при эксплуатации и ремонте пятивальцовых мельниц.

Цель работы. Целью работы является повышение долговечности вальцов пятивальцовых мельниц кондитерского производства для обеспечения стабильности качества отвальцованного полуфабриката.

Задачи исследования. В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие задачи:

- выбор направления повышения долговечности вальцов пятивальцовых мельниц;
- теоретическое обоснование профиля рабочей поверхности вальцов и параметров ее профилирования;
- выбор теоретической модели изнашивания вальцов, ее модифицирование и адаптация к условиям работы пятивальцовых мельниц;
- определение исходных данных для расчета износа вальцов;
- разработка инженерной методики расчета износа вальцов на основе выбранной теоретической модели;
- компьютерное моделирование профилей новых и изношенных вальцов и выявление критериев износа.

Выработка рекомендаций для разработки технологии восстановления рабочей поверхности вальцов.

Объекты и методы исследования. В работе применены теоретические и экспериментальные методы исследования. Теоретические исследования профиля вальцов пятивальцовых мельниц кондитерского производства проведены

с использованием метода непрерывного интегрирования упругой линии их прогиба. При исследовании изнашивании и расчете износа вальцов использована расчетная модель, модифицированная и адаптированная для многовальцовых агрегатов.

Экспериментальные исследования проходили в промышленных условиях – на пятивальцовых мельницах ОАО «Кондитерский концерн «Бабаевский» Для анализа состава, структуры и механических характеристик материала вальцов была использована аналитическая и металлографическая аппаратура.

Математическое моделирование, обработка результатов исследований и проверка адекватности математического описания и расчетных моделей выполнены на ЭВМ с применением специально разработанных программ и стандартных приложений.

Предмет исследования – совокупность методов повышения долговечности рабочих органов пятивальцовых мельниц кондитерского производства.

Научная новизна диссертационной работы:

- разработана математическая модель расчета профилей рабочей части вальцов;

- предложена расчетно-аналитическая модель изнашивания вальцов, которая получена путем модифицирования и адаптирования к условиям работы пятивальцовой мельницы модели изнашивания пар трения;

- показано, что существенный вклад в износ вальцов вносит абразивная составляющая вальцуемого полуфабриката и, с учетом механических свойств, размера и концентрации абразивных частиц, выполнена ее количественная оценка;

- предложен «критерий неравномерности износа вальцов», определяющий степень их эксплуатационной пригодности;

- разработан алгоритм и предложена компьютерная программа контроля состояния, расчета износа вальцов и построения ремонтного профиля;

- разработаны рекомендации для определения ремонтопригодности и построения ремонтных профилей вальцов, предложена периодичность оценки

износа вальцов и перечень проводимых мероприятий; созданы предпосылки для промышленного производства вальцов на территории РФ.

Практическая значимость и реализация результатов работы. На основании исследований предложена методика контроля изменения профиля вальцов пятивальцовых мельниц и математического расчета их износа в процессе эксплуатации с помощью компьютерного моделирования. Данная методика использована в конструкторско-технологической документации, актах экспертизы и техническом задании на восстановление вальцов пятивальцовых мельниц.

Результаты научных разработок реализованы на ОАО «Кондитерский концерн «Бабаевский», ЗАО «Кондитер-Курск», ОАО «Рот Фронт» и других предприятиях при ремонте пятивальцовых мельниц фирм «Carle & Montanari SpA» (Италия) и «Petzholdt Heidenauer GmbH» (Германия).

Достоверность полученных результатов гарантируется применением поверенных приборов и утвержденных методик лабораторного анализа, апробированных расчетных методик, методов статистической обработки результатов, согласованием расчетных данных и результатов экспериментов.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы доложены на конференциях:

1) Всероссийская НТК «Качество и безопасность продовольственного сырья и продуктов питания», МГУПП, 2000 г.;

2) 2-я международная НТК «Инженерия поверхности и реновация изделий», г. Ялта, 2002 г ;

3) 3-я международная НТК «Инженерия поверхности и реновация изделий», г. Ялта, 2003 г.;

4) IV Международная конференция «Кондитерские изделия XXI века», Москва, 2003 г.

5) Международная НТК «Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении», г. Одесса, 2004 г.

6) Международная НТК «Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении», г. Одесса, 2004 г

Результаты работы внедрены на ведущих кондитерских предприятиях отрасли и в учебном процессе высшей школы.

Публикации. Материалы диссертации отражены в 7-ми печатных работах.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из аннотации на английском и немецком языках, введения, четырех глав, рекомендаций по практической реализации результатов, заключения, списка сокращений, списка литературы и четырех приложений.

Общий объем диссертации составляет 150 страниц, в том числе: 29 страниц с рисунками и фотографиями, 10 страниц списка литературы из 121 наименования (из них 17 зарубежных) и 45 страниц приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы, цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе освещено состояние вопроса о способах измельчения сырья и полуфабриката пищевой промышленности и измельчающем оборудовании, к которому предъявляются такие требования, как максимально возможная производительность при регламентированном качестве продукции; возможность управления качеством конечного продукта во время работы агрегата; минимальные энерго- и материалоемкость; максимальная надежность и долговечность оборудования; низкая стоимость оборудования и простота его обслуживания.

Проведен анализ долговечности рабочих органов и технических характеристик оборудования, применяемого для дробления какао крупки, измельчения какао тертого и вальцевания шоколадных масс и глазурей.

Установлено, что при эксплуатации вальцовых, ударно-штифтовых, шариковых мельниц и молотковых дробилок доминируют усталостный и абразивный виды износа.

Анализ литературных источников по исследованию процессов изнашивания рабочих органов измельчающих машин позволил установить, что основные факторы, определяющие степень и интенсивность износа, определяются внешними механическими воздействиями на поверхности трения: родом трения (качение, скольжение), скоростью относительного перемещения трущихся поверхностей, величиной и видом давления при их взаимодействии; структурно-механичсскими свойствами перерабатывасмого материала, наличием абразивных частиц между поверхностями трения; механическими свойствами и структурой материалов рабочих органов: пределом текучести, пределом прочности, твердостью, ударной вязкостью, пластичностью, усталостной прочностью.

Повышение износостойкости и увеличение ресурса рабочих органов измельчающего оборудования реализуется в настоящее время по двум основным направлениям: применение новых марок износостойких материалов и упрочнение поверхности деталей из существующих материалов.

Но эти направления в большинстве случаев для пищевой промышленности неприемлемы по санитарно-гигиеническим нормам. Многие из методов упрочнения поверхности возможны только с использованием уникального оборудования при значительных материальных и энергетических затратах. Поэтому они реализованы лишь на опытных или экспериментальных образцах и широкого применения не получили.

Изучение литературных источников и анализ технического состояния рабочих органов измельчающего оборудования в кондитерском производстве позволили определить круг актуальных задач (сформулированных в общей характеристике работы), пути и методы решения которых изложены в последующих главах диссертации.

Во второй главе теоретически обоснованы форма рабочей поверхности и метод расчета износа вальцов пятивальцовых мельниц.

Особенностью конструкции вальца является «бочкообразный» профиль его рабочей поверхности. Такая форма вальца обеспечивает компенсацию его прогиба при работе и создает постоянную величину межвальцового зазора по всей его длине.

Методом неопределенного интегрирования уравнения упругой линии балки с переменным сечением проведен расчет профиля (обратной линии прогиба) вальца, максимально учитывающий его конструктивные особенности (Рис. 1).

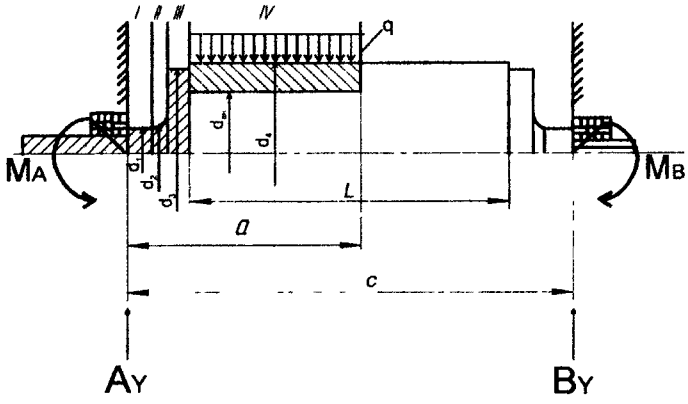

Рис. 1. Схематическое представление вальца:
l – длина рабочей (нагруженной) части; *a* – расстояние от опорного подшипника (места заделки) до середины вальца; *c* – расстояние между опорами

Последовательно от участка I к участку IV проведен расчет вальца и получены аналитические выражения для величины его прогиба:

- на первом участке:

$$y_1(x) = \frac{1}{E_1 I_{Z1}}\left[-M_A\frac{x^2}{2} + A_Y\frac{x^3}{6}\right], \qquad (1)$$

где E_1 – модуль упругости материала I участка вальца;

M_A – величина момента опоры А;

A_Y – реакция опоры А

I_{Z1} – момент инерции сечения I участка вальца;

- на втором участке:

$$y_2(x) = -\frac{32M_A}{E_1\pi \cdot 3 \cdot 2{,}867^2} \cdot \frac{1}{(2{,}867x + 5{,}714)^2} + \frac{32A_Y}{E_1\pi \cdot 2{,}867^3} \cdot \frac{1}{(2{,}867x + 5{,}714)} + \\ + \frac{32A_Y \cdot 5{,}714}{E_1\pi \cdot 2{,}867^3 \cdot 3} \cdot \frac{1}{(2{,}867x + 5{,}714)^2} + Lx + K \qquad (2)$$

где $L = \Theta_1(x_{1,2})$ – угол поворота в конце первого участка;

$K = y_1(x_{1,2})$ перемещение в конце первого участка.

- на третьем участке:

$$y_3(x) = \frac{1}{E_1 I_{Z3}}\left[-M_A\frac{x^2}{2} + A_Y\frac{x^3}{6}\right] + Mx + N, \qquad (3)$$

где $M = \Theta_2(x_{2,3})$ – угол поворота в конце второго участка;

$N = y_2(x_{2,3})$ – перемещение в конце второго участка.

Участок IV является рабочей частью вальца, на которой сосредоточена распределенная нагрузка q. Прогиб на этом участке:

$$y_4(x) = \frac{1}{E_4 I_{Z4}}\left[-M_A\frac{x^2}{2} + A_Y\frac{x^3}{6} - \frac{qx^4}{24} + Tx + W\right], \qquad (4)$$

где $T = \Theta_3(x_{3,4})$ – угол поворота в конце третьего участка;

$W = y_3(x_{3,4})$ – перемещение в конце третьего участка;

$I_{Z4} = \frac{\pi d_4^4}{64} - \frac{\pi d_{вн}^4}{64} = \frac{\pi}{64}\left(d_4^4 - d_{вн}^4\right)$ момент инерции сечения на четвертом участке.

Исходя из конструктивных параметров, характеристик материала вальцов и с учетом прилагаемой нагрузки, получено выражение для описания линий их профилей, однако для проверки адекватности этого выражения необходимо провести непосредственные измерения «бочкообразности» новых вальцов.

При решении задачи повышения долговечности вальцов пятивальцовых мельниц и выборе расчетно-аналитической модели изнашивания учитывались комплексность воздействия факторов износа поверхности вальцов

В основу аналитического расчета износа вальцов положена модель для исследования изнашивания пар трения качения, работающих с проскальзыванием, разработанная И.В. Крагельским, которая была модифицирована и адаптирована для расчета износа вальцов с учетом их геометрии и материала рабочей части, кинематических параметров мельницы и свойств вальцуемой массы.

Согласно модели И.В. Крагельского величины линейных износов поверхностей 1-го и 2-го вальцов (м), вызываемых одной частицей:

$$\Delta И_{h1} = \frac{\sigma_y^{2,5} \cdot r^{2,5} \cdot |\upsilon_1 - \upsilon_2|}{12 \cdot (HB_1)^{1,5} \cdot (HB_2) \cdot \varepsilon_0^t \cdot S \cdot (\alpha\upsilon_1 + \beta\upsilon_2)} \cdot \sqrt{2\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}},$$

$$\Delta И_{h2} = \frac{\sigma_y^{2,5} \cdot r^{2,5} \cdot |\upsilon_1 - \upsilon_2|}{12 \cdot (HB_2)^{1,5} \cdot (HB_1) \cdot \varepsilon_0^t \cdot S \cdot (\alpha\upsilon_1 + \beta\upsilon_2)} \cdot \sqrt{2\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}}, \quad (5)$$

где ε_0 – относительное удлинение материала вальцов при разрыве;

t – коэффициент контактно-фрикционной усталости материала при пластической деформации;

S – площадь изнашиваемой поверхности.

Для расчета выделены следующие основные независимые параметры: линейные скорости точек поверхности вальцов (v_1 и v_2); зазоры между вальцами (δ); твердость (HB), относительное удлинение (ε_0), плотность (ρ_B) и коэффициент контактно-фрикционной усталости (t) материала рабочей части вальца; концентрация абразивных частиц (C_a), их средний радиус (r) и предел прочности (σ_y).

Для решения задачи определения долговечности вальцов целесообразно пользоваться безразмерным, количественным критерием их износа, зависящим не от времени эксплуатации, а от массы (M) отвальцованного полуфабриката. Таким параметром является удельный износ ($И_{уд}$).

$$И_{уд} = \frac{И_м}{Q\ T} = \frac{И_м}{M}, \quad (6)$$

где Q – производительность мельницы;

T – период эксплуатации вальцов;

$И_м$ – весовой износ

Производительность мельницы определялась при угла захвата вальцуемого полуфабриката (α_0) и его плотности (ρ_M)

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot \left[2 \cdot R \cdot \left(1 - \cos\alpha_0\right) + \delta\right] \cdot R \cdot f \cdot \rho_M . \qquad (7)$$

С учетом (6) и (7) расчетно-аналитическое выражение (5) для удельного износа

$$И_{УД} = \frac{\left(C_a\right)^{2/3} \cdot \sigma_y^{2,5} \cdot r^{0,5}}{\rho_M} \cdot \frac{\sqrt{R} \cdot \left|\nu_1 - \nu_2\right|}{\left(\nu_1 + \nu_2\right) \cdot \left[2 \cdot R \cdot \left(1 - \cos\alpha_0\right) + \delta\right]} \cdot \frac{\rho_B}{\varepsilon_0^t \cdot HB^{2,5}} . \qquad (8)$$

При анализе формулы (8) можно выделить три группы факторов, учитывающих:

$$A = \frac{\left(C_a\right)^{2/3} \cdot \sigma_y^{2,5} \cdot r^{0,5}}{\rho_M}$$ – абразивное действие; (9)

$$K = \frac{\sqrt{R} \cdot \left|\nu_1 - \nu_2\right|}{\left(\nu_1 + \nu_2\right) \cdot \left[2 \cdot R \cdot \left(1 - \cos\alpha_0\right) + \delta\right]}$$ – кинематические и геометрические параметры вальцов; (10)

$$M = \frac{\varepsilon_0^t \cdot HB^{2,5}}{\rho_B}$$ – механические свойства материалов. (11)

Тогда формула (8) принимает вид:

$$И_{УД} = 9{,}3 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{A \cdot K}{M} . \qquad (12)$$

Объемный ($И_V$) и весовой ($И_M$) износы рассчитываются:

$$И_V = И_Л \cdot S = И_Л \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot L , \qquad (13)$$

$$И_M = И_V \cdot \rho_B = И_Л \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot L \cdot \rho_B . \qquad (14)$$

При непосредственных измерениях величины линейных износов вальцов:

$$И_{Л} = \frac{\sum_{i=1}^{j}(d_{0i} - d_i)}{j}, \qquad (15)$$

где d_{0i} и d_i – диаметры нового и изношенного вальцов в j-м сечении;

j – количество измерений диаметров (сечений) рабочей части вальца.

Величина объемного износа $И_V$ определялась как разность объемов рабочей части нового и изношенного вальцов методом компьютерного интегрирования аппроксимирующих функций их профилей.

В третьей главе определены параметры профилирования рабочей части вальцов. Разработана компьютерная программа математического описания профилей вальцов. Показано, что профили как новых, так и изношенных вальцов могут быть адекватно аппроксимированы степенными функциями с точностью, зависящей только от точности измерительного инструмента.

Для проверки предлагаемой расчетно-аналитической модели экспериментально найдены численные значения параметров, входящих в выражение (8).

Для определения состава и дисперсности вальцуемого полуфабриката периодически каждые 6 месяцев от начала эксплуатации нового комплекта вальцов для сравнения результатов проводилось пробное вальцевание (всегда одной рецептуры) при одном и том же (номинальном для новых вальцов) давлении.

Показано (рис. 2), что доля мелкодисперсной (до 35 мкм) фракции в отвальцованном полуфабрикате уменьшается по мере увеличения износа вальцов.

На практике дисперсность отвальцованного полуфабриката в течение всего периода эксплуатации вальцов обеспечивают компенсацией межвальцовых зазоров за счет увеличения давления на вальцы, что приводит к повышению

интенсивности их изнашивания, и, как следствие, к увеличению содержания абразивных примесей – продуктов износа – в отвальцованном полуфабрикате.

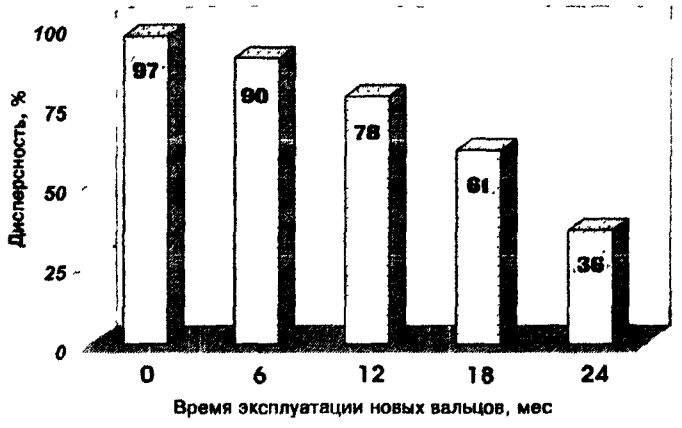

Рис. 2 Зависимость доли частиц (%) размером менее 35 мкм от продолжительности эксплуатации нового комплекта вальцов пятивальцовой мельницы

Методом магнитной сепарации и многократного отмучивания в различных растворителях взвеси шоколадной массы определена концентрация и дисперсность частиц износа. Анализ магнитной фракции примесей показал, что она состоит из частиц цементита (около 90 % по массе) и тонкодисперсного порошка оксида железа (III) – Fe_2O_3. В немагнитном остатке количественного определяемого абразива не обнаружено.

Определение концентрации абразивных частиц в полуфабрикате на входе в мельницу и при его отборе после вальцевания позволило оценить вклад в интенсивность изнашивания как продуктов износа самих вальцов, так и рабочих органов предшествующего измельчающего оборудования.

Методами электронно-зондового рентгеновского спектрального микроанализа и высокотемпературной газовой экстракции определен химический состав материала рабочей части вальцов.

Проведен послойный металлографический анализ микроструктуры материала рабочей части вальцов. Результаты показали, что это доэвтектический низколегированный отбеленный чугун белый – в поверхностном слое, половинчатый – в середине, серый – во внутренних слоях.

Основной структурной составляющей отбеленного чугуна, является превращенный ледебурит, содержащий большое (около 50 %) количество цементита, твердость которого по разным источникам превышает 8000 МПа. В структуре поверхностного слоя отбеленного чугуна помимо ледебурита содержатся и другие структурные составляющие (перлит и небольшое количество графита), что обусловливает хорошую сопротивляемость износу и одновременно делает его менее хрупким. По мере приближения по глубине к центру вальца в структуре увеличивается количество графита и уменьшается количество ледебурита. При этом существенно падает значение твердости чугуна. В табл. 1 приведены усредненные результаты определения твердости вальца в зависимости от расстояния от его поверхности. Ввиду отсутствия на исследуемом вальце изношенного слоя глубиной 3 мм, информация о его твердости получена путем экстраполяции кривой, описывающей изменение твердости по глубине (рис. 3).

Таблица 1

Результаты определения твердости материала вальцов

Расстояние от поверхности образца, мм	**1**	**2**	**7**	**10**	**13**	**16**	**18**	**21**	**24**	**26**
Твердость, НВ	510	482	435	400	360	348	305	284	270	230

Рис 3. Распределение твердости по глубине рабочей части вальца: □ – реальные измеренные значения; ▬ – линия-аппроксимация, построенная расчетным путем; S – граница поверхности образца изношенного вальца

Полученное интерполяцией значение твердости 576 НВ совпадает с результатами независимых измерений на поверхности новых вальцов (550 – 580 НВ), что позволяет использовать полученное распределение твердости для прогнозирования и расчетов реального износа вальцов.

В четвертой главе проведена проверка адекватности расчетных моделей профиля и изнашивания вальцов и разработаны рекомендации для промышленной реализации результатов

По формулам (1), (2), (3), (4) проведен расчет прогиба вальцов пятивальцовых мельниц в при вальцевании.

Результаты показали, что расчетные профили всех вальцов практически совпадают с реальными, так как находятся в пределах доверительного интервала значений непосредственно измеренных диаметров вальцов.

На рис. 4, как пример, приведены для сравнения расчетный профиль и данные измерений профиля реальной рабочей поверхности одного из вальцов (разность номинального и текущего радиусов вальца с точностью + 0,005 мм).

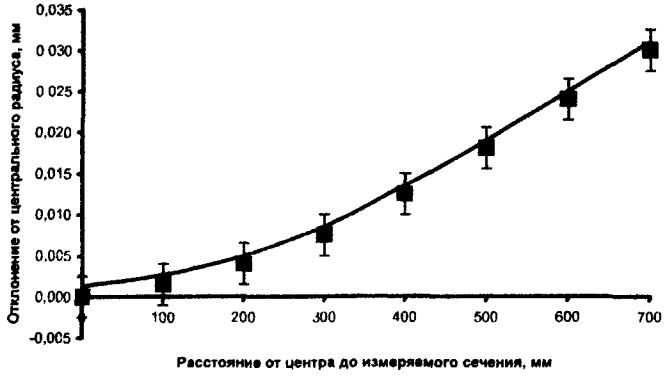

Рис 4. Сравнение результатов измерений вальца (точки ■) с линиями профилей, рассчитанными методом непрерывного интегрирования (линия –)
(валец IV мельницы Carle & Montanari SpA)

Разработанная методика использована для расчета износа вальцов по результатам их измерений. Объектом расчета служили пять комплектов вальцов пятивальцовых мельниц до и после эксплуатации в течение 2-3 лет в условиях кондитерского производства. На рисунке 5 в качестве примера приведен профиль одного из вальцов до эксплуатации и после выработки ресурса.

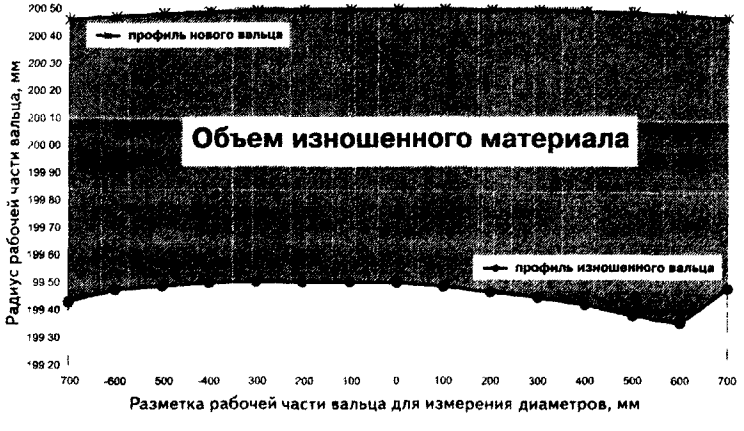

Рис 5 Профили нового и изношенного вальца I (мельница Petzholdt Heidenauer GmbH)

Для оценки неравномерности износа вальцов предложен безразмерный расчетный критерий G, равный отношению разности максимального и минимального значений линейного износа для данного вальца к его линейному (среднему) значению износу:

$$G = \frac{\max(И_Л) - \min(И_Л)}{И_Л}. \qquad (16)$$

Критерий показывает долю износа, обусловленную его неравномерностью от средней величины линейного износа вальца.

На основе результатов измерений размеров и в соответствии с разработанной компьютерной программой проведен расчет усредненного линейного, объемного и удельного износа. Результаты расчетов приведены в таблице 2 и проиллюстрированы гистограммой (рис. 6).

Таблица 2

Результаты расчета параметров износа вальцов (Мельница "Petzholdt Heidenauer GmbH" 1400 мм)

№ вальца	Линейный износ, $И_Л \times 10^{-3}$, м	Объемный износ, $И_V \times 10^3$, $м^3$	Весовой износ, $И_М = И_V \cdot \rho_В$, кг	Удельный износ, $И_{УД} = И_М/М \times 10^{-6}$ кг/кг	Критерий неравномерности износа $G = \frac{\max(И_Л) - \min(И_Л)}{И_Л}$, %
1	1,802	1,580	11,69	2,60	21,2
2	3,341	2,930	20,96	4,66	6,9
3	3,522	3,090	22,86	5,08	34,9
4	2,661	2,339	17,32	3,85	27,8
5	0,678	0,589	4,36	0,97	16,2
			Σ = 77,20		

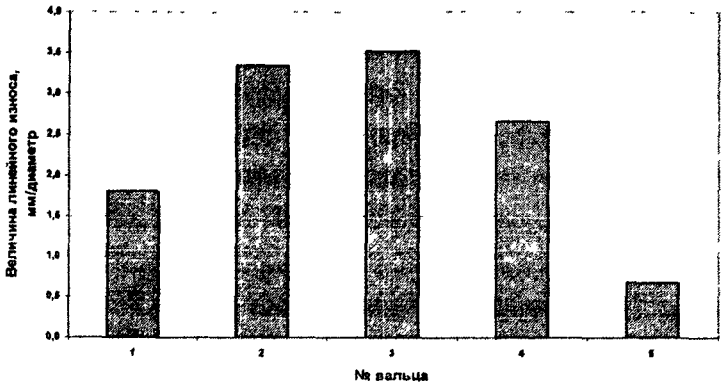

Рис. 6. Сводный график значений линейного износа отдельно по вальцам (Мельница "Petzholdt Heidenauer GmbH" 1400 мм)

Для количественной оценки адекватности предложенной расчетной модели – выражение (10) – проведен расчет суммарного удельного износа всех вальцов на примере двух пятивальцовых мельниц (рис. 7).

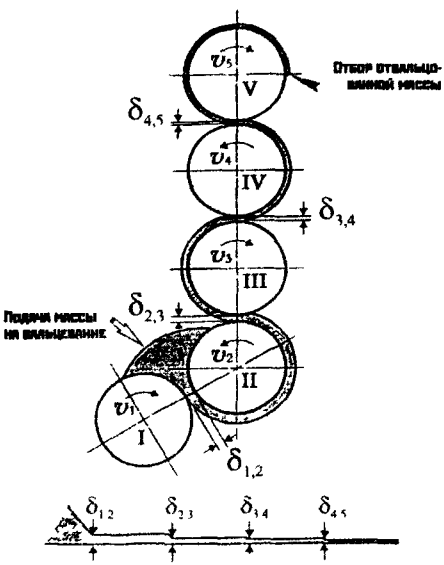

Рис. 7. Схема прохождения вальцуемой массы между вальцами

Величины рабочих зазоров между вальцами были определены из условия непрерывности потока вальцуемой массы:

$$\delta_{1,2} \cdot \upsilon_2 = \delta_{2,3} \cdot \upsilon_3 = \delta_{3,4} \cdot \upsilon_4 = \delta_{4,5} \cdot \upsilon_5 \quad . \tag{17}$$

Для каждой пары вальцов получено:

$$\begin{cases} K_{1,2} = \dfrac{2\sqrt{R} \cdot |v_1 - v_2|}{(v_1 + v_2) \cdot [2 \cdot R \cdot (1 - \cos\alpha_0) + \delta_{1,2}]} \\ K_{2,3} = \dfrac{2\sqrt{R} \cdot |v_2 - v_3|}{(v_2 + v_3) \cdot [2 \cdot R \cdot (1 - \cos\alpha_0) + \delta_{2,3}]} \\ K_{3,4} = \dfrac{2\sqrt{R} \cdot |v_3 - v_4|}{(v_3 + v_4) \cdot [2 \cdot R \cdot (1 - \cos\alpha_0) + \delta_{3,4}]} \\ K_{4,5} = \dfrac{2\sqrt{R} \cdot |v_4 - v_5|}{(v_1 + v_2) \cdot [2 \cdot R \cdot (1 - \cos\alpha_0) + \delta_{4,5}]} \end{cases} \tag{18}$$

Так как 2-й, 3-й и 4-й вальцы подвергаются изнашиванию со стороны двух соседних, для них факторы износа были просуммированы:

$$K_I = K_{1,2};\ K_{II} = K_{1,2} + K_{2,3};\ K_{III} = K_{2,3} + K_{3,4};\ K_{IV} = K_{3,4} + K_{4,5};\ K_V = K_{4,5}. \tag{19}$$

Значение $\frac{A}{M}$ для всех вальцов одинаково:

$$\frac{A}{M} = 9{,}3 \cdot 10^{-4} \frac{(C_a)^{2/3} \ \sigma_3^{2,5} \cdot r^{0,5} \cdot \rho_B}{HB^{2,5} \cdot \varepsilon_0^t \cdot \rho_M} \ . \tag{20}$$

В таблице 3 сведены численные значения теоретического удельного износа (по расчетной модели) и значения, полученные на основе прямых измерений. По результатам прямых измерений диаметров новых и изношенных вальцов, вычислен объем материала, пошедшего на износ, который был отнесен к объему полуфабриката, прошедшего через мельницу за весь межремонтный период. На рис. 8 дана соответствующая сводная гистограмма.

Таблица 3

Сводная таблица результатов расчета износа вальцов

№ вальца	К	$\frac{A}{M} \times 10^9$	Удельный износ $И_{уд} \times 10^6$, кг/кг		
			Теоретический	Экспериментальный	
			$К \frac{A}{M}$	"РН" 1400	"С & М" 1800 (приведено к 1400)
1	696	6,13	2,14	2,60	3,40
2	1736		5,35	4,66	5,10
3	1760		5,42	5,08	5,65
4	1043		3.21	3,85	4,35
5	323		1,00	0,97	1,00
		Σ =	17,12	17,16	19,50

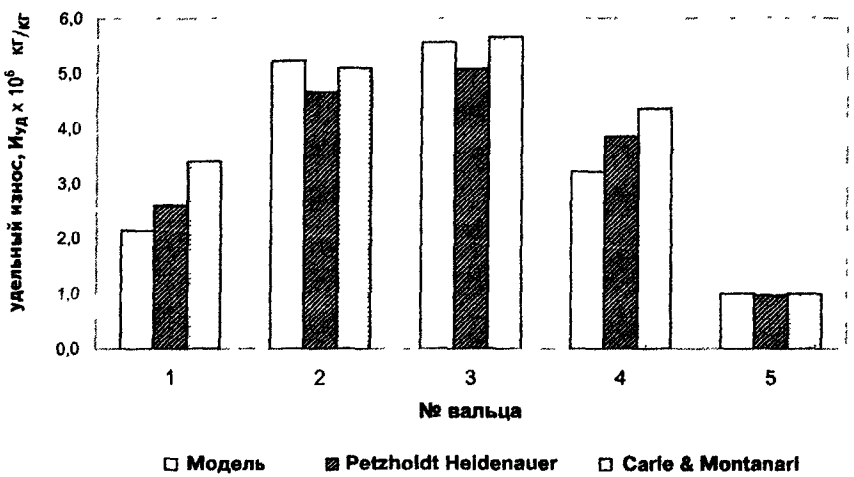

Рис. 8. Сводная гистограмма удельного износа вальцов

Сравнение характера гистограммы износа, рассчитанного по предлагаемой модели, и гистограмм реального износа вальцов (рис. 8) мельниц фирм Petzholdt Heidenauer GmbH (**"PH"** 1400) и Carle & Montanari (**"C & M"** 1800) показывает их сходство. Более того, значения реального суммарного и теоретического удельного износа вальцов мельницы **"PH"** 1400 практически равны. Оценка износа отдельно по вальцам показывает некоторое расхождение (от 5 до 18 %) расчетных результатов с реальными. Такое расхождение может быть связано с неравномерностью износа вальцов, вызванной нестабильностью технологических факторов при вальцевании продукта: колебанием величины зазоров между вальцами, локальными нарушениями сплошности потока вальцуемой массы и несимметричностью распределенной нагрузки по длине вальца.

Результаты работы определили периодичность и метод контроля износа, способ оценки состояния износа комплекта вальцов, что позволяет выдавать рекомендации по их дальнейшей эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа современного состояния исследований процессов изнашивания и существующих способов защиты рабочих органов измельчающего оборудования кондитерского производства в целях обеспечения стабильности качества отвальцованного полуфабриката выбран и научно обоснован метод восстановления вальцов многовальцовых мельниц.

2 Разработана методика расчета и получено аналитическое выражение для описания линий прогиба вальцов в процессе их эксплуатации. Экспериментально подтверждено, что расчетная линия прогиба вальцов адекватно описывает их реальный «бочкообразный» профиль.

3 Разработана программа компьютерного моделирования профилей вальцов. Показано, что оптимальной функцией, аппроксимирующей профиль вальцов является степенная функция. Программа позволяет проводить расчет профилей новых и изношенных вальцов, определять их износ, а также выполнять построение ремонтного профиля

4 Предложен расчетный критерий G, который позволяет оценивать характер износа рабочей поверхности вальцов, их ремонтопригодность, а также назначать оптимальное количество ремонтов.

5 Результаты исследования структуры, химического состава и механических свойств материала рабочей части вальцов показали, что это отбеленный низколегированный доэвтектический чугун, твердость которого максимальна на поверхности и уменьшается по толщине стенки вальца, что позволяет определять максимально допустимое уменьшение его диаметра при эксплуатации и ремонте.

6. Предложена модель изнашивания, модифицированная и адаптированная для расчета удельного износа вальцов с учетом их взаимного расположения, физико-механических свойств материала вальцов, их кинетических и геометрических параметров, а также свойств вальцуемой массы. Выведено аналитическое выражение их суммарного износа, для расчета которого экспериментально определены состав и концентрация абразивной составляющей

вальцуемого полуфабриката (шоколадной массы) до и после прохождения его через вальцовую мельницу Установлено, что это ферромагнитные частицы продукты износа рабочих органов измельчающих агрегатов технологической линии шоколадного производства, в том числе и самих чугунных вальцов.

7. Адекватность предложенной теоретической модели подтверждена экспериментально на примерах эксплуатации в условиях производства пятивальцовых мельниц фирм "Carle & Montanari SpA" и "Petzholdt Heidenauer GmbH"

8. Доказано, что износ вальцов вызван одновременным воздействием абразивного и усталостного механизмов изнашивания. Величина абразивной составляющей износа определяется механическими свойствами, размером и концентрацией присутствующих в шоколадной массе частиц - продукта износа рабочих органов измельчающего оборудования. Усталостная составляющая износа определяется плотностью вальцуемой массы и интенсивностью ее переработки. Анализ частиц, снятых после вальцевания массы с магнитного сепаратора, показал, что их размеры и форма соответствуют характеру дефектов поверхности вальцов.

9. Выявлены конструкторско-технологические резервы повышения долговечности вальцов, разработана методика экспертизы; даны рекомендации по технологии восстановления

10. Основные результаты работы внедрены на ведущих кондитерских предприятиях отрасли и в учебном процессе высшей школы. Восстановление вальцов пятивальцовых мельниц по технологии, использующей результаты данной работы, реализовано на отечественных предприятиях. Это позволило отказаться от ремонтных услуг зарубежных заводов-изготовителей и снизить (на 70 %) затраты на восстановление вальцов.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Чувахин С.В., Лавринович Д.С. К проблеме увеличения срока эксплуатации рабочих органов измельчающего оборудования истирающего действия кондитерского производства. // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции-выставки с международным участием «Качество и безопасность сырья и продуктов питания». Т. II. - М: издательский комплекс МГУПП, 2001. – С. 165.

2. Лавринович С.Б., Чавчанидзе А.Ш., Чувахин С.В., Лавринович Д.С. Повышение долговечности и реновация рабочих органов и сборочных единиц пищевого оборудования // Инженерия поверхности и реновация изделий. Материалы 2-й международной конференции, 28-30 мая 2002 г. г. Ялта. - Киев: АТМ Украины, 2002 г.

3. Лавринович Д.С., Лавринович С.Б., Чавчанидзе А.Ш., Чувахин С.В., Износостойкость рабочих органов пищевых машин и качество продуктов питания. // Актуальные проблемы пищевой промышленности. Сборник научных исследований ученых и аспирантов, Москва, 2003 г.

4. Чувахин С.В., Лавринович Д.С., Гончаров А.Б. Технология восстановления рабочих органов пятивальцовых мельниц. // Кондитерские изделия XXI века. Материалы IV международной конференции, 17-21 марта 2003 г., Москва.

5. Чувахин С.В., Лавринович Д.С Технология ремонта вальцов пятивальцовых мельниц // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении. Материалы научно-технической конференции, 2-4 июня 2004 г., г. Одесса.

6. Лавринович Д.С., Чувахин С.В. Компьютерное моделирование профиля и расчет износа вальцов пятивальцовых мельниц кондитерского производства. Деп. 14.12.04, № 1981-В2004.

7. Лавринович Д.С. Теоретическое обоснование профиля рабочей поверхности вальцов мельниц кондитерского производства. Деп. 14.12.04, № 1980-В2004.

Формат 30х42 $^{1}/_{8}$. Бумага типографская № 1. Печать офсетная.

Печ. л. 1,2. Тираж 100 экз. Заказ 117.

125080, Москва, Волоколамское ш., 11

Издательский комплекс МГУПП

№-879

РНБ Русский фонд

2006-4
14102