

На правах рукописи

Ковылин Анатолий Петрович

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НОЖЕЙ
ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СВЕКЛОРЕЗОК
ВОССТАНОВЛЕНИЕМ И УПРОЧНЕНИЕМ ГРАНЕЙ
ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ**

Специальность: 05.20.03 – Технологии и средства
технического обслуживания в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Саратов 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова».

Научный руководитель – **Рудик Феликс Яковлевич**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Лялякин Валентин Павлович**, доктор технических наук, профессор ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка» (ГОСНИТИ), научный консультант;

Лебедев Анатолий Тимофеевич, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет», заведующий кафедрой «Технологический сервис, стандартизация и метрология».

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет»

Защита диссертации состоится «___» _____ в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.061.03 на базе ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова» по адресу: 410056, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ» и на сайте www.sgau.ru.

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 410012, г. Саратов, Театральная пл., 1. Ученому секретарю диссертационного совета Д 220.061.63; e-mail: chekmarev.v@yandex.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Чекмарев Василий Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Сахар является одним из продуктов, обогащающих организм человека углеводами. Его потребляют все слои населения в достаточно больших количествах. Годовые потребности в этом продукте в России оцениваются в 5,5–5,6 млн т, при этом наша страна импортирует около 2,5–3,5 млн т в год в основном из Польши и Бразилии.

Серьезным технологическим недостатком при производстве сахара в России считается низкая степень извлечения сахара из свеклы. Потери при этом достигают 28–30 % и зависят от начальной операции переработки – измельчения в стружку. В связи с особым биологическим строением сахарной свеклы, где свекловичный сок заперт в вакуоли стенками паренхимной клетки, для извлечения сахарозы необходимо измельчение корнеплодов ножами особой конструкции, обеспечивающими оптимальные параметры длины и проницаемости стружки.

Жесткие условия работы ножей в процессе измельчения ведут к необходимости их частых перезаточек из-за интенсивного затупления режущих кромок и замены по причине деформации и разрушения граней. В этой связи исследование причин интенсивной потери работоспособности ножей, невысоких показателей их долговечности и отсутствия эффективных технологий их восстановления и упрочнения актуально.

В данной работе на основании изучения причин интенсивного изнашивания ножей и ухудшения в связи с этим качественных показателей стружки предложены технологии с комплектами оснастки для восстановления и упрочнения граней. Работа выполнялась в соответствии с «Комплексной программой развития биотехнологии в РФ» № 1853п-П8 от 24 апреля 2012 г., а также направлением Саратовского госагроуниверситета № 01201151793 «Ресурсосберегающие технологии безопасных пищевых технологий».

Степень разработанности темы. Закономерности измельчения растениеводческой продукции исследовались такими зарубежными и отечественными учеными, как К. Honda, К. Takahazi, G. Schewitz, В.П. Горячкин, Г.И. Бремер, В.А. Желиговский, Г.И. Новиков, Е.И. Резник, Е.С. Босой и др. Исследованиями В.П. Лялякина, А.Т. Лебедева, В.Н. Хромова и др. ученых установлено, что вследствие интенсивного изнашивания показатели работоспособности и долговечности деталей режущего аппарата незначительны. Требуется частые ремонтно-обслуживающие воздействия. Однако в их трудах недостаточно исследованы процессы измельчения сахарной свеклы, изнашивания диффузионных ножей и их восстановления.

Опираясь на исследования Ю.Д. Пашина, Ф.Я. Рудика, С.А. Богатырева, С.А. Элькина и др. ученых, автор диссертационной работы использовал для восстановления ножей методы пластического деформирования, дающие

упрочняющий эффект и способствующие высокому ресурсосбережению.

Цель работы – повышение долговечности ножей центробежных свеклорезок (ЦС) путем восстановления и упрочнения их граней пластическим деформированием.

Задачи исследования:

1. Проанализировать особенности изнашивания и дефектного состояния ножей ЦС, обосновать показатели, позволяющие оценить зависимость длины и проницаемости свекловичной стружки от износостойкости режущих кромок и выносливости на изгиб граней.

2. Провести анализ силового взаимодействия ножа со свеклой при измельчении, установить причины интенсивного изнашивания и разрушения граней и теоретически обосновать схемы их формообразования при восстановлении и упрочнении пластическим деформированием.

3. Экспериментально исследовать схемы формообразования граней ножей, разработать конструкции оснастки, установить физико-механические факторы, обеспечивающие повышение долговечности восстановленных и упрочненных пластическим деформированием ножей.

4. Экспериментально исследовать технологический процесс, установить рациональные режимы, провести производственную проверку и эксплуатационные испытания ножей, восстановленных и упрочненных методом пластического деформирования, дать технико-экономическую оценку эффективности разработки.

Научная новизна работы:

– выполнен анализ причин, обуславливающих влияние износостойкости режущих кромок и прочностных показателей граней ножей на процесс измельчения свеклы и качество свекловичной стружки;

– выявлены закономерности упрочнения граней ножей и повышения показателя их долговечности по теоретически и экспериментально обоснованным схемам формообразования с использованием методов горячей пластической деформации;

– установлены связи упрочнения и повышения долговечности ножей с улучшением показателей качества измельчения, оцениваемого длиной и проницаемостью стружки, с посменным износным состоянием режущих кромок и уменьшением длины граней.

Теоретическая и практическая значимость работы:

– предложены технологии восстановления и упрочнения ножей свеклорезных установок, определены рациональные схемы формообразования и режимы восстановления и упрочнения материала граней пластическим деформированием, что позволило повысить наработку на отказ на 18–20 % и выход сахарозы на 25–27 %;

– установлена критериальность зависимости основных качественных показателей измельчения сахарной свеклы, оцениваемых длиной стружки и ее проницае-

мостью от посменного износного состояния режущих кромок и долговечности ножей;

– разработана штамповая и прокатная оснастка, выполнены ее производственная проверка и оценка эффективности измельчения сахарной свеклы восстановленными и упрочненными ножами.

Методология и методы исследования. Методологической основой работы является системный подход к изучению и описанию процессов измельчения сахарной свеклы, изнашивания свеклорезных ножей и упрочнения их граней.

Теоретические исследования проведены с использованием известных положений теоретической механики и сопротивления материалов, теорий упругости, трения и износа, теории вероятностей и современных компьютерных методов анализа достоверности результатов исследований. Экспериментальные исследования выполнены на реальных образцах ножей, изготовленных по традиционной и экспериментальной технологиям на действующей макетной оснастке в лабораторных и производственных условиях. Достоверность полученных результатов подтверждается применением современных методов исследования, поверенных приборов и оборудования, стандартных методик физико-механических исследований.

Положения, выносимые на защиту:

– результаты теоретических и экспериментальных исследований причин изнашивания граней ножей при измельчении сахарной свеклы, обоснованные конструктивно-технологические направления их упрочнения методами пластического деформирования;

– зависимости влияния процесса формообразования граней на структурные, физико-механические и эксплуатационные показатели ножей, обуславливающие их упрочнение и повышение долговечности;

– разработанные и апробированные в лабораторных и эксплуатационных условиях технологический процесс и комплекты оснастки для формообразования граней ножей при восстановлении и упрочнении с положительной технико-экономической эффективностью.

Степень достоверности и апробация результатов обеспечены высокой сходимостью данных теоретических и экспериментальных исследований, проведением испытаний технологии и оснастки в лабораторных и производственных условиях.

Основные научные положения, выводы и практические рекомендации доложены и одобрены на научно-практических конференциях ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ» (Саратов, 2011, 2012, 2013); на Международных научно-практических конференциях «Технология и продукты здорового питания» (ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ», Саратов, 2011, 2012, 2013); на Международной научно-практической конференции «Научные проблемы технического сервиса»

(ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии РФ, г. Москва, 2013); на юбилейной Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения профессора А.Г. Рыбалко (ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ», Саратов, 2011).

По результатам исследований опубликовано 10 работ, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки РФ. Общий объем публикаций составляет 4,2 печ. л., из которых 2,3 печ. л. принадлежат лично соискателю, получено 2 патента на полезную модель.

Диссертация состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка литературы, включающего в себя 154 наименования, из них 5 – на иностранных языках. Работа изложена на 150 страницах, содержит 62 рисунка и 14 таблиц. Приложения представлены на 62 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы степень разработанности, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Изложены методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, цели и задачи исследования.

В первом разделе «**Особенности изнашивания и дефектное состояние ножей центробежных свеклорезок при измельчении сахарной свеклы**» рассмотрены вопросы, связанные с особенностями измельчения сахарной свеклы в стружку, выявлены причины, ведущие к значительному, достигающему до 28–30 %, недоизвлечению сахарозы из вакуолей корнеплода. Установлены зависимости качества стружки, оцениваемого ее длиной и проницаемостью, от износостойкости режущих кромок граней ножа (рисунок 1).

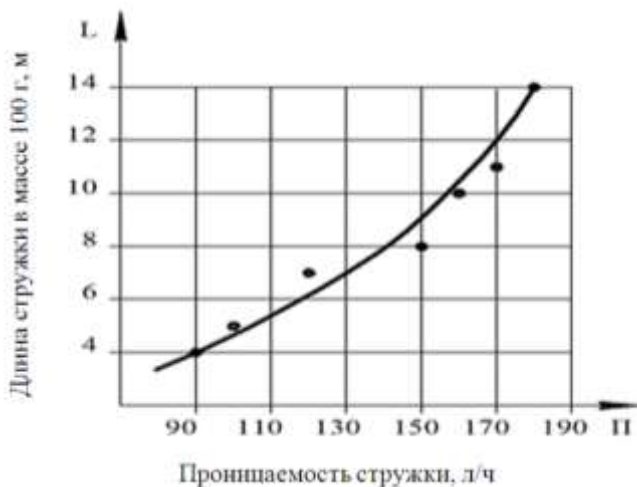


Рисунок 1 – Зависимость проницаемости стружки от ее длины в течение одной смены работы

По мере работы ЦС и протекающего процесса постепенного изнашивания ножей режущая кромка последних затупляется, что изменяет характер измельчения. Процесс резания протекает с ощутимым воздействием упругой деформации свеклы, что вызывает отклонения от оптимальной толщины стружки, которая должна составлять 0,0005 м. Установлено, что к концу каждой смены процесс изнашивания интенсифицируется и резание при встрече свеклы с режущей кромкой протекает с ощутимым воздействием упругой деформации. Это вызывает от-

клонения от оптимальной толщины стружки, которая с позиции лучшей проницаемости не должна превышать 0,0005 м. Вследствие изменения условий резания длина стружки в конце смены достигает 4–8 м в 100 г навески, что влечет за собой снижение ее проницаемости на 28...30 %.

В этой связи зависимость технологических показателей свекловичной стружки от технического состояния режущих кромок граней ножа изучалась путем анализа видов и последствий критичности отказов по следующим направлениям:

выявление возможных видов отказов составных частей, изучение их причин, механизмов и условий возникновения и развития;

определение возможных неблагоприятных последствий возникновения выявленных отказов, проведение качественного анализа тяжести последствий отказа;

выработка предложений и рекомендаций по внесению изменений в конструкцию и технологию восстановления и изготовления изделия и его составных частей, направленных на снижение вероятности и тяжести последствий отказов, оценка эффективности ранее проведенных доработок.

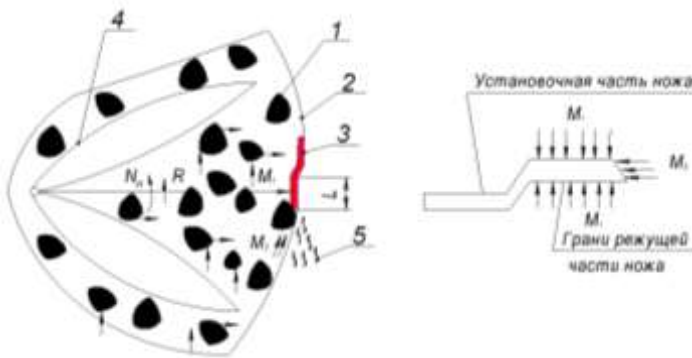


Рисунок 2 – Схема процесса измельчения свеклы в ЦС:

1 - свекла; 2 - неподвижный цилиндр; 3 - нож;
4 - улитка; 5 - стружка

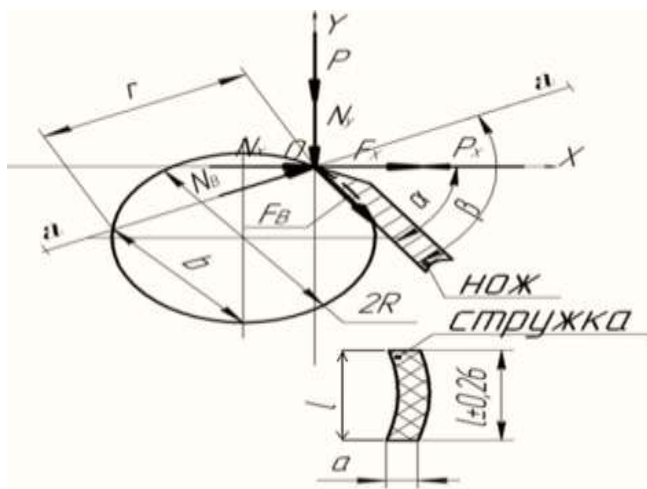


Рисунок 3 – Силовой анализ рабочего процесса измельчения

Во втором разделе «Теоретические исследования технологических схем формирования граней свеклорезных ножей с повышенными показателями долговечности» с целью установления причин снижения качества стружки исследован рабочий процесс измельчения корнеплода в ЦС. Установлено, что нагрузка, приходящаяся на режущие грани зигообразного ножа, возникает от ударных воздействий каждой очередной свеклы на ножи и при ее последующем инерционном измельчении в центробежной установке (рисунок 2). Расчетами установлены рабочие параметры процесса измельчения:

- производительность – 420 – 450 т/сутки;
- скорость резания – 6,59 м/с;
- цикличность нагрузений – 50 тыс. циклов/сутки;
- момент на резание свеклы – 1726,6 Н·м;

– момент на преодоление сил трения – 1233,5 Н·м.

Основными показателями, характеризующими качество измельчения, являются длина l и толщина a стружки (рисунок 3). Только их оптимальные соотношения позволяют получать максимальный выход сахарозы в диффузионном аппарате. При встрече измельчаемой свеклы с режущими кромками ножа возникает усилие P_x , затрачиваемое на преодоление силы реакции N_x свеклы на внедрение в нее ножа. Сила F_x характеризует трение между гранями ножа и поверхностью среза в плоскости резания $a-a$, расположенной под углом α к оси OX . При измельчении свеклы проекция нормальной силы на ось OX , характеризующая силу преодоления изгиба стружки, обозначена N_β , а проекция на ось OX силы трения поверхности грани ножа о стружку – P_x . Исходя из условия равновесия в проекциях сил на оси OX и OY , проведя необходимые преобразования и учитывая коэффициент трения свеклы о грань, получим:

$$F_x = \mu N_\beta (\cos \beta - \mu \sin \beta), \text{Н.} \quad (1)$$

$$P_x = N_x + N_\beta [\sin \beta (1 - \mu) + 2\mu \cos \beta], \text{Н.} \quad (2)$$

В точке касания O радиальные и касательные напряжения при условии $r = 2R \sin \alpha$:

$$\sigma_r = \frac{2P \sin \alpha}{2\pi r \sin \alpha} = \frac{P}{\pi R}; \quad \tau_{\max} = \frac{P \sin \alpha}{2\pi R \sin \alpha} = \frac{P}{2\pi R}, \text{Па.} \quad (3)$$

Процесс разрушения волокон свеклы зависит от максимального изгибающего напряжения с учетом зоны упругой деформации мякоти свеклы:

$$\sigma_{\text{рп}} = \frac{[6\pi R l l_1 [\sigma_{\text{сж}}] \sin \beta + l^2 b [\sigma_{\text{сж}}] y_0]}{6J} - \frac{\mu [\sigma_{\text{сж}}] l l_1}{2S}, \text{Па,} \quad (4)$$

где l – длина контакта стружки с гранью, м; l_1 – длина режущих кромок граней, м; b – ширина стружки, м; y_0 – самая удаленная от нейтральной оси точка сечения стружки, м; J – момент инерции, Нм; $[\sigma_{\text{сж}}]$ – допускаемое напряжение сжатия свеклы, Па.

Испытываемые при измельчении корнеплода напряжения значительны по величине и интенсивности их приложения к режущей кромке и граням ножа, что и обуславливает низкие показатели наработки на отказ. Момент на резание свеклы M_2 , возникающий от ее инерционного перемещения по режущим кромкам граней ножей и усилий P_x и F_x , значителен. Он вызывает неравномерный износ по длине режущих кромок (рисунок 4), что уже к концу смены ведет к отказу по качеству стружки.

Уже к концу каждой смены затупленность режущих кромок ведет к упругой деформации волокон свеклы, изменению процесса резания с соответствующим ухудшением качества стружки и уменьшением выхода сахарозы в диффузионном аппарате. Этот отказ устраняется ежесменными заточками, что укорачивает длину

ножа грани и ведет к достижению после шести смен работы предельного состояния и выбраковке.



износ

разрушение

деформация

Рисунок 4 – Дефектное состояние ножей

Разрушение граней ножа по причине воздействия момента M_1 , возникающего от ударов раскрученных улиткой корнеплодов о грани с предельно допустимыми показателями предела выносливости на изгиб при симметричном цикле нагружения, ведет к выбраковке. Данному невосстанавливаемому дефекту подвергается до 30 % ножей, и это обуславливает необходимость упрочнения граней.

Деформация плоскости граней со стрелой изгиба, направленной к плоскости резания, уменьшает угол α (рисунок 3) и ведет к защемлению стружки в окне схода. Данному отказу ежемесячно подвергается до 70 % ножей, его устраняют простой рихтовкой, что для закаленной до HRC 55–60 стали У7 недопустимо, возникающие микротрещины при толщине стенки грани 0,8...1,0 мм интенсифицируют процесс разрушения. Данный дефект целесообразно устранять методом горячей пластической деформации в специальной штамповой оснастке по схеме, представленной на рисунке 5.

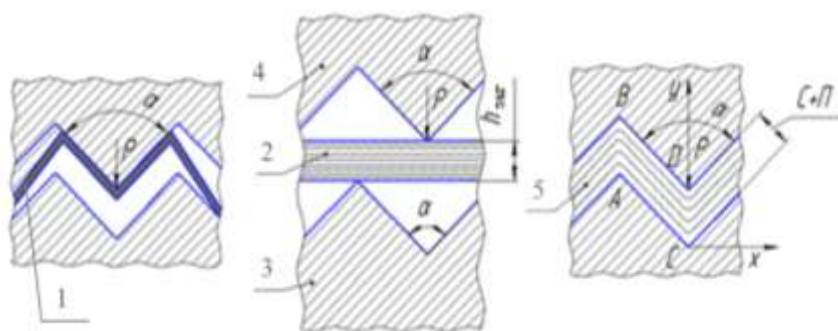


Рисунок 5 – Схема формообразования граней при их восстановлении и упрочнении:

- 1 – деформированные грани; 2 – заготовка;
3 – матрица; 4 – пуансон; 5 – сформированные грани ножа;

P – приложение усилия деформации;

$h_{\text{заг}}$ – толщина заготовки;

ностях будет направлено по касательной и пересекать поверхность матрицы под

Технологически повышение безотказности осуществимо путем улучшения свойств материала заготовки при формировании режущих поверхностей пластической деформацией (рисунок 5).

Исходя из того, что на деформирующих поверхностях пуансона и матрицы возникают максимальные касательные напряжения $\tau = k$, семейство линий скольжения на соприкасающихся поверх-

углом $\varphi = \pi/2$. Таким образом, линии скольжения AB формируют боковые поверхности и пики граней режущей части, а линии скольжения $AC-BD$ – боковые поверхности и впадины граней.

Нормальные напряжения при деформации заготовки σ_n , МПа, определяются по формуле:

$$\sigma_n = 2k \left(1 + \frac{\pi}{2}\right). \quad (5)$$

$$\sigma_n = -\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \left(1 + \frac{\pi}{2}\right) = -\frac{2}{\sqrt{3}} 2,57 \sigma_s = -1,155 \cdot 2,57 \sigma_s = -2,87 \sigma_s, \quad (6)$$

где σ_s – напряжение текучести материала, МПа.

Усилие для деформации пластины с n гранями имеет вид:

$$P = 2,87 \sigma_s \cdot \sin \frac{\alpha}{2} S n, \quad (7)$$

где S – площадь поперечного сечения одного сектора пуансона; n – число граней.

На основании теоретических и лабораторных исследований изготовлены и испытаны образцы оснастки для правки граней при восстановлении и для штамповки заготовок при изготовлении ножей (рисунок 6). Сменные элементы выполнены для правки граней толщиной 0,8–1,0 мм (рисунок 7).

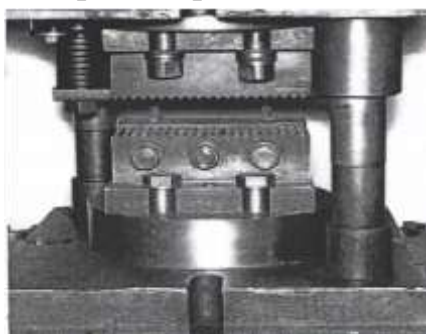


Рисунок 6 – Опытно-конструкторская оснастка



Рисунок 7 – Сменные элементы

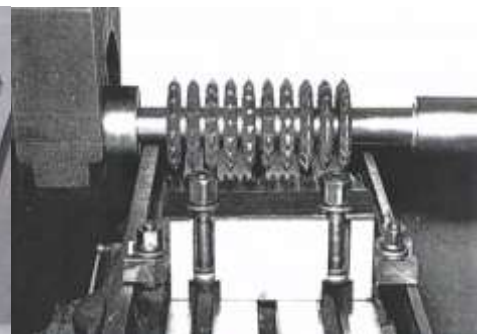


Рисунок 8 – Оснастка для механической обработки граней

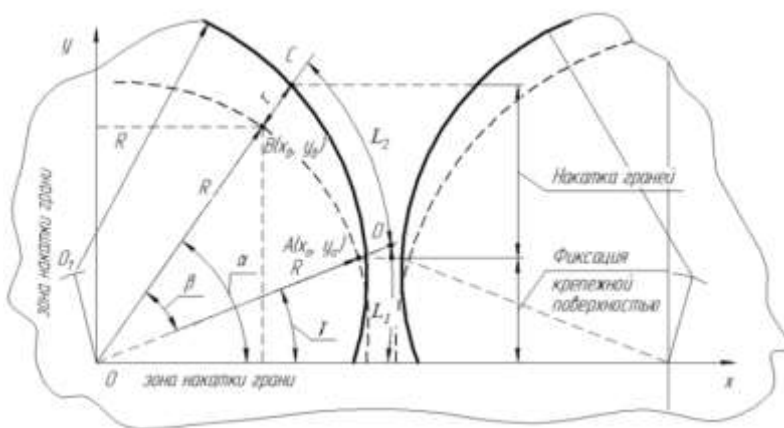


Рисунок 9 – Расчетная схема смещения геометрических осей деформирующих элементов

Оснастка для механической обработки граней (рисунок 8) выполнена в виде многофрезерной оправки, одновременно обрабатывающей половину граней ножа. Это позволяет осуществить всю механическую обработку за 2 перехода. Жесткость оправки и точность обработки граней обеспечиваются уже сформированным штамповкой профилем зубьев и не-

значительным (1 мм) припуском на механическую обработку.

С целью обеспечения стабильных размеров граней и повышения эффекта упрочнения граней рассмотрено формообразование ножа при восстановлении и изготовлении в накатной установке со смещенными осями, что позволяет править и формировать режущие грани с незначительным линейным приращением их оснований (рисунок 9).

Согласно уравнениям окружности геометрических осей описаны переменные координаты окружности с координатами точек C , B и D , объединение которых в профиль обеспечивает переменную деформацию накаткой граней от их основания и до режущей кромки:

$$x_A = R \sin \gamma; \quad y_A = R \cos \gamma; \quad x_B = -(R - a) \sin \beta; \quad y_B = (R - a) \cos \beta. \quad (8)$$

Необходимые для смещения осей центров показатели углов α , β и γ равны:

$$\alpha = \frac{h_1 \cdot 180^\circ}{\pi R}; \quad \gamma = \frac{h_2 \cdot 180^\circ}{\pi R}; \quad \beta = (\alpha - \gamma) = \frac{(h_1 - h_2) \cdot 180^\circ}{\pi R}, \quad (9)$$

где h_1 – ширина ножа в произвольном сечении, мм; h_2 – длина режущих граней, мм.

Второй вариант восстановления ножей – прокатка. Для этого разработана оснастка (рисунок 10, 11), выполненная со смещением осей валцов, что позволяет формиро-

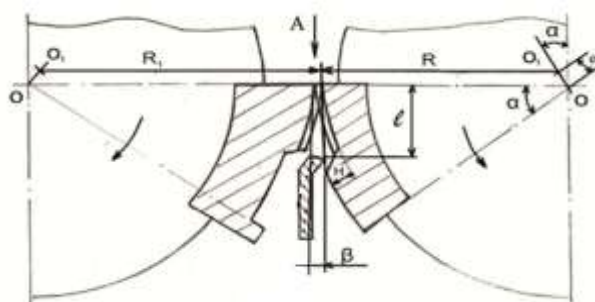


Рисунок 10 – Схема формообразования в накатной установке



Рисунок 11 – Вальцовая установка для прокатки

вать режущие грани с незначительным линейным приращением их оснований. При этом условии обеспечения постоянного утолщения основания грани исследовалось по схеме, представленной на рисунке 10.

Выражения, полученные при теоретическом анализе схемы формообразования, являются исходными для проектирования деформирующих элементов со смещенными геометрическими осями.

Второй дефект, связанный с выносливостью граней на изгиб при эксплуатации, не может быть устранен, что обуславливает целесообразность замены материала, применения упрочняющей технологии изготовления и, самое основное, изменения конструкции ножа с обеспечением повышенных показателей предела выносливosti граней на изгиб.

В используемых в настоящее время ножах грани длиной 48 мм в сечении по всей длине выполнены толщиной 0,8–1,0 мм. Вследствие воздействия на грани

ударных циклических нагрузжений около 2150 Н·м и момента на преодоление сил трения свеклы о режущие грани около 1150 Н·м они деформируются и разрушаются. На этом основании возникает необходимость конструктивного упрочнения граней ножа, которое следует осуществить на расстоянии 1,5–2,0 толщины грани от режущей кромки с углом приращеня дна и высоты грани, составляющим 2... 3° (патент № 130542).

Нож данной конструкции с дополнительным углом наклона режущей грани обеспечивает постоянное по длине грани приращение толщины сечения дна и вершины грани. Наличие переменного по длине дополнительного линейно возрастающего от режущей кромки до основания граней утолщения позволит значительно повысить выносливость на изгиб ножа с соответствующим увеличением показателей его долговечности.

Приращение толщины дна и высоты граней осуществляется с помощью вальцово́й установки (см. рисунок 11), на которую получен патент № 150113.

В третьем разделе «**Методика экспериментальных исследований**» представлены частные методики исследования технологического процесса с комплектами оснастки для восстановления и упрочнения свеклорезных ножей с повышенными показателями износостойкости, выносливости на изгиб и ресурсосбережения. При изучении процесса формообразования режущих граней: усилие, температура и скорость деформации контролировались с использованием датчиков давления, пиропатронов и измерительного инструмента. Металлографические исследования проводили с помощью электронного микроскопа МИМ-8М. Микротвердость деформированной поверхности проверяли по методу *HV* прибором ПМТ-3, позволяющим оценивать механические свойства материала послойно.

Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре ДРОН-3.0 с Fe-K α -излучением в режиме «запись диаграммы» со скоростью движения ленты 800 мм/ч, с пределом измерения $10^2 \dots 10^4$ имп./с и пределом времени – 10 с.

При съемках использовали два режима: общая дифракционная картина устанавливалась при *V*-сканировании 2 град./м, интервале $2\Theta = 50^\circ \dots 115^\circ$, шаге сканирования 1° , напряжении на трубке $U = 20$ кВ, анодном токе $I_a = 10$ мА, отражении (110); аналитические рефлексy эталона также устанавливали при отражении (110) при *V*-сканировании 0,5 град./м, шаге сканирования $0,05^\circ$, напряжение на трубке $U = 20$ кВ, анодном токе $I_a = 10$ мА.

Напряженное состояние образца рассчитывали как сумму двух главных напряжений по методу $\sin^2 \varphi$:

$$\sum \varphi = -(\sigma_1 + \sigma_2)(\mu E), \quad \sigma_{1,2} = \frac{\Delta a}{a} E, \quad (10)$$

где σ_1 и σ_2 – напряжения в двух главных направлениях; μ – коэффициент Пуас-

сона; $\frac{\Delta a}{a}$ – относительная микродеформация решетки; E – модуль упругости материала, $E = 21,8 \cdot 10^{-3}$ ГПа.

Остаточные напряжения контролировали через 0,1 мм по ромбовидному сечению режущих граней.

Рентгеноструктурным исследованиям подвергали субмикронапряжения, дающие характеристику ориентации, связанной со структурой атомной решетки, позволяющей оценивать плотность дислокаций. Число линий дислокаций, проходящих через единицу площади, и, соответственно, состояние субмикронапряжений определяли методом квадратичной зависимости плотности дислокаций ρ от истинного уширения линии β на рентгенограмме:

$$\rho = A\beta^2, \quad (11)$$

где A – коэффициент, характеризующий вектор Бюргерса, зависящий от упругих свойств материала; для железных сплавов $A \approx 2 \cdot 10^{16}$ см⁻².

Величину искажения кристаллической решетки в направлении, перпендикулярном плоскости отражения (HKL), вычисляли по формуле:

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\beta}{4\text{tg}V_{\text{HKL}}}, \quad (12)$$

где V_{HKL} – дифракционный угол отражения от плоскости HKL.

Предел выносливости на изгиб оценивали на вибрационной установке ВУ 5/5000 с режимными характеристиками: диапазоном изменения частоты колебаний 5...5000 Гц; максимальным ускорением процесса устойчивости на изгиб $g_{\text{max}} = 20$ Н/см²; максимальной амплитудой колебаний $A_{\text{max}} = 3/1,8$ мм; массой испытываемых деталей – до 5 кг.

Износостойкость экспериментальных ножей исследовали в соответствии с рекомендациями, установленными ГОСТ 30480–97 по циклу ускоренных испытаний на износостойкость. При этом решалась задача выбора наилучших конструктивно-технологических решений и оценки долговечности экспериментальных ножей для измельчения сахарной свеклы. Лабораторные испытания проводились методом моделирования условий внешнего воздействия с оценкой фрикционно-износных характеристик пары трения «ролик – колодка» на машине трения.

Эксплуатационным испытаниям в реальных производственных условиях на ОАО «Балашовский сахарный комбинат» подвергались ножи типа 1011В, установленные в двенадцатирамную центробежную свеклорезку марки СЦБ-12А. В качестве объектов исследования приняты: ножи свеклорезные безреберные из стали У7; ножи свеклорезные экспериментальные, изготовленные по параметрам, указанным в патентах № 130542 и 150113, с упрочненными режущими гранями из износо- и коррозионностойкой стали 40Х13.

С целью создания идентичных условий испытаний ЦС комплектовали двухножевыми рамками по схеме: 1, 3, 5, 7 – с традиционными и 2, 4, 6, 8 – с экспериментальными ножами. Это позволило контролировать техническое состояние ножей и качество свекловичной стружки ежемесячно при проведении технического обслуживания ЦС.

Регистрацию технического состояния ножей при эксплуатации осуществляли в соответствии с регламентом, установленным на предприятии, согласно которому заточку режущих кромок и замену ножей с предельными износами и усталостными разрушениями проводили после окончания каждой смены.

Критериальность и достоверность результатов экспериментальных исследований оценивали по программе MSExcel из пакета программа Microsoft Office с использованием метода наименьших квадратов и построением регрессионных уравнений.

В четвертом разделе **«Результаты экспериментальных исследований»** представлены результаты лабораторных и производственных проверок разработанных технологии и технических средств для восстановления деформированных и формообразования граней ножа с повышенными показателями износостойкости и выносливости на изгиб.

Основным условием преддеформационного нагрева ножей при их восстановлении и изготовлении являлось обеспечение достаточной пластичности и усилия деформации при штамповке и прокатке с достижением монолитности структуры и упрочнения граней за счет направленной пластической деформации.

При правке ножей, изготовленных из инструментальной углеродистой стали У7 и У8, оптимальной принята температура в интервале 550...600 °С, соответствующая температуре нормализации.

Для штамповки ножей установлен оптимальный температурный интервал, составляющий 950...1050 °С.

Температуру преддеформационного нагрева устанавливали из условия обеспечения высоких пластических свойств начала процесса деформации и их сохранения в течение всего периода штамповки с учетом остуживания. При этом в качестве важного рубежного фактора принимали соблюдение конструктивных формы и размеров ножа.

Исходя из результатов экспериментальных исследований, следует сделать вывод о целесообразности формообразования ножа в интервале температур 950...1050 °С. Деформация при пониженных температурах ведет к низкому качеству формообразования режущих граней, снижению скорости деформирования и прочностных показателей оснастки. Повышенная же температура не дает никаких технических преимуществ и воздействует разрушающе на структуру металла.

При высадке заготовки ромбовидный профиль режущих граней обеспечивается формообразующими гранями матрицы и пуансона. При этом они конструктивно исполнены так, что при формообразовании 5-миллиметровая пластина повторяет профиль граней и в сечении режущей плоскости высота грани возрастает по высотам двусторонних ромбов до 9 мм.

Направленное пластическое деформирование с непрерывным формообразованием граней говорит о явном общем упрочняющем эффекте исследуемой технологии по всему сечению ножа.

Правка ножей при установленной температуре, находящейся в интервале температур возврата и рекристаллизации, позволяет получить мелкозернистую структуру с повышением износостойкости и выносливости на изгиб.

Упрочнение ножей также обусловлено изменением дисперсности зерен, протекающим за счет их дробления и образования мозаичной структуры, вытянутости зерен и структуры в целом в направлении тангенциального сдвига при деформации граней и пластины ножа. Несомненно, эти обстоятельства ведут к повышению износостойкости и выносливости режущих граней на изгиб.

Микротвердость в краевых участках граней экспериментальных ножей достигает 580 МПа, а у граней ножей, изготовленных по традиционной технологии, – 485 МПа. Это подтверждает наличие эффекта упрочнения на 27 %. Характерным является распределение микротвердости по глубине слоя. У серийного ножа она одинаковая по всей толщине сечения, а у экспериментального в средней части снижается на 40 МПа. Это свидетельствует о более плотном строении зерен по краям грани, объясняемым процессом двойникования в конце высадки. Несколько сниженная микротвердость в центре грани позволяет повысить стойкость грани к образованию субмикротрещин.

Установлено, что в режущих гранях после пластической деформации возникают напряжения сжатия, имеющие небольшие расхождения значений по глубине слоя. Остаточные напряжения у традиционных ножей имеют принципиально отличное направление, так как возникают при резании и термообработке. При высадке и прокатке ножа по всему сечению граней возникают остаточные напряжения сжатия, достигающие по краям режущей плоскости 68 МПа. Это более чем в 5 раз превышает напряженное состояние традиционных ножей и говорит об упрочнении граней, что позволяет повысить износостойкость режущих кромок и выносливость ножа на изгиб.

Сравнительный анализ искажения кристаллической решетки, характеризующий упрочнение металла при пластическом деформировании ножей, свидетельствует о том, что при формообразовании граней высадкой и прокаткой на границах зерна металла, состоящего из отдельных мозаичных блоков, сориентированных друг относительно друга при тангенциальном сдвиге, возникают скопления дислокаций. Их по-

казатели у экспериментальных граней ножей находятся на достаточно высоком уровне, составляющем в крайних точках $9,8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, в среднем слое за счет процесса температурного уравнивания они снижаются на 143 %. Это также обуславливает эффект упрочнения.

Картина изменения выносливости восстановленных и экспериментальных ножей на изгиб при симметричном цикле нагружений схожа с традиционными ножом, только уже после 72 ч испытаний выносливость увеличивается менее интенсивно. После 144 ч испытаний, что составляет 6 смен непрерывной работы, наблюдаются разрушения граней, свидетельствующие о предельном состоянии при достижении $8 \cdot 10^6$ циклов нагружений. Предельной величины выносливости на изгиб экспериментальные ножи достигают после 10–12 смен работы с нагружением $11 \cdot 10^6$ циклов.

В соответствии с графиком (рисунок 12) износостойкость ножей характеризуется

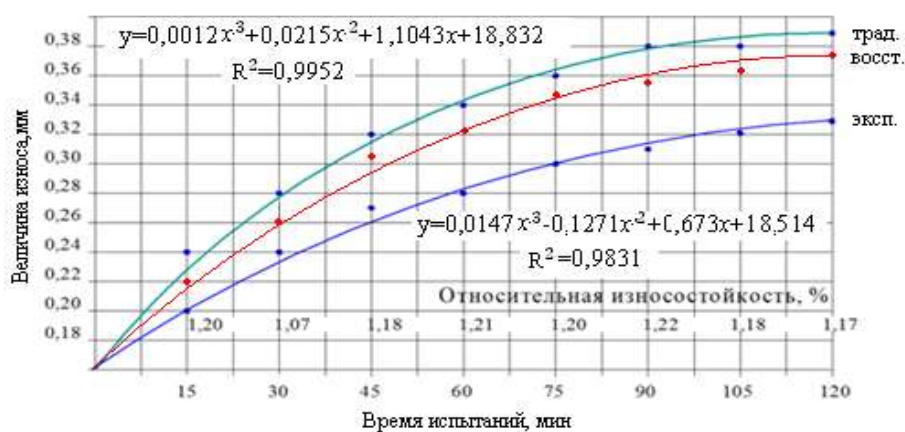


Рисунок 12 – Износ режущих кромок ножей

(около 1,0 мм) и, соответственно, полной их прокаливаемостью по глубине слоя, что обеспечивает достаточно высокую стабильность микротвердости. В последующем

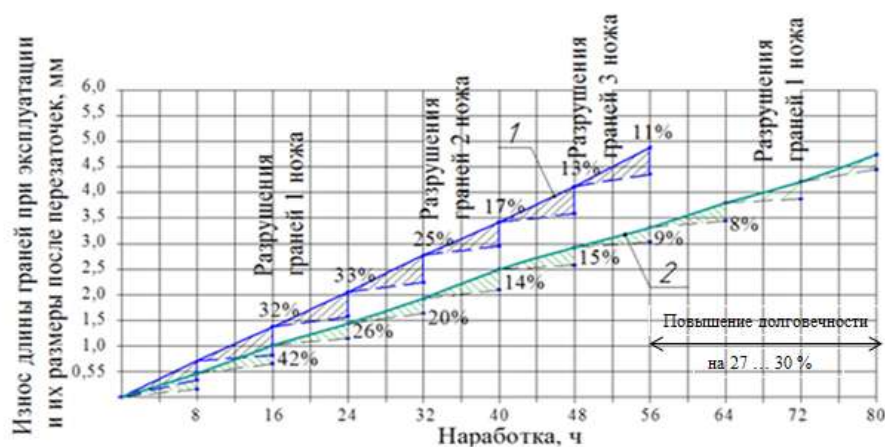


Рисунок 13 – График зависимости износного состояния длины граней на показатели безотказности и долговечности в эксплуатационных условиях: 1 – традиционный нож; 2 – экспериментальный нож

линейной зависимостью процесса изнашивания по времени. Показатели кривых, характеризующих износостойкость традиционных и экспериментальных ножей на начальный момент эксперимента, приблизительно сходны. Это объясняется небольшой толщиной режущих граней

интенсивность изнашивания возрастает, что соответствует теории изнашивания, согласно которой величина износа при прочих равных условиях прямо пропорциональна пути: $\frac{dU}{dt} = S$.

Качество технологической операции измельчения сахарной свеклы характеризуется длиной

свекловичной стружки, обеспечиваемой только техническим состоянием ножа при исследуемой продолжительности резки. Каждое сверхдопустимое коробление и затупление режущей кромки следует считать отказом, возникающим постепенно, в течение длительного периода времени, по причине протекающего процесса изнашивания, и в итоге ведущим к снижению долговечности ножа. Вследствие отказов возникают проблемы, связанные с изменением характера измельчения свеклы, ухудшением качества стружки и в итоге – недополучением сахарозы.

Производственными исследованиями процесса измельчения установлена зависимость выхода качественной стружки от технического состояния ножа. Ножи, изготовленные по традиционной конструкции и технологии, изнашиваются более интенсивно и фактически после каждой смены требуют перезаточки (рисунок 13).

Неравномерный износ длины граней по всей ширине ведет к необходимости выравнивания режущей кромки и съема у традиционных ножей около 0,5 мм металла. Вследствие повышения износостойкости у серийных ножей съем металла приблизительно равен 0,1 мм. После ежесменной заточки длина граней у традиционных ножей укорачивается на 0,7 мм, а у серийных – на 0,4 мм. Интенсивность укорачивания граней после 24 ч наработки у экспериментальных ножей уменьшается на 30 %, что свидетельствует о повышении их износостойкости. Изменение износостойкости при последующей наработке протекает по линейному закону и находится на 30%-м уровне повышения. Показатели графика свидетельствуют, что после каждого устранения отказов ежесменными перезаточками режущих кромок длина граней у традиционного ножа достигает своего предельного состояния после 6–7 смен работы, а у экспериментального – после 10 смен. Показатели долговечности экспериментальных ножей за счет упрочнения материала граней при восстановлении и изготовлении ножей по разработанной технологии возрастают на 30 %. Ресурс экспериментальных ножей увеличивается на 24 часа.

Разрушения граней ножей, характеризующие их выносливость на изгиб от ударных воздействий свеклы, также свидетельствует о протекающем процессе упрочнения ножа при пластическом деформировании и конструктивном утолщении дна. За 64-часовой цикл наработки разрушению подверглись 3 традиционных и 1 экспериментальный, что свидетельствует о 25%-м повышении предела выносливости на изгиб.

На начальный период измельчения свеклы длина стружки у традиционных и экспериментальных ножей находилась в оптимальном интервале, составляющем 14,0–14,5 мм на 100 г массы. К концу первой смены она уменьшилась у традиционных ножей на 27 %, а у экспериментальных – на 18 %; это объясняется повышением износостойкости граней ножей.

После устранения первого отказа путем торцевания и заточки режущих граней

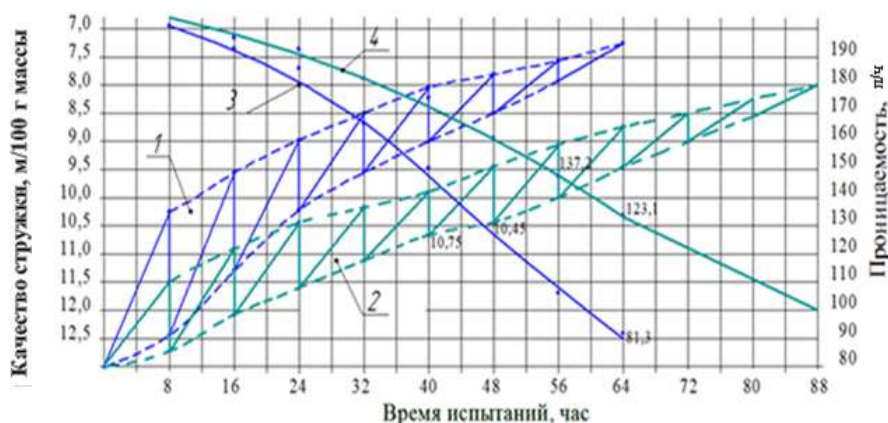


Рисунок 14 – Изменение длины и проницаемости свекловичной стружки: 1 – традиционные ножи; 2 – экспериментальные ножи.

обеспечивает более высокую проницаемость, составляющую 191,5 л/ч. После каждой последующей смены в связи с накоплением износов длина стружки уменьшается на 7–8 %.

После шестой смены длина стружки, полученной с помощью традиционных ножей, укорачивается до предельного состояния 7–8 м с уменьшением проницаемости до 90–80 л/ч, что обеспечивает показатель долговечности традиционных ножей 48–56 ч наработки.

Уменьшение длины и проницаемости стружки у экспериментальных упрочненных ножей менее интенсивно. Длина достигает своего предельного состояния 8 м к 11-й смене. Проницаемость при этом составляет 95 л/ч.

Таким образом, упрочнение граней ножей пластическим деформированием позволяет повысить долговечность ножей на 27...30 % и обеспечить при этом допустимые показатели качества стружки.

Анализом критериальности зависимости технологических показателей измельчения – длины и проницаемости стружки от величины износа граней ножа установлено, что линейные регрессии с 97%-й достоверностью подтверждают посменное увеличение на 18–20 % длины и на 16–18 % проницаемости стружки, полученной с помощью экспериментальных ножей.

В пятом разделе «Технико-экономическая эффективность результатов исследований» представлены результаты расчетов технико-экономической эффективности их использования при производстве сахара. Установлено, что за счет принятия новой упрочняющей и ресурсосберегающей технологии, основанной на формообразовании режущих граней ножей пластической деформацией, наблюдаются позитивные изменения основных показателей. Себестоимость изготовления ножей составляет 139 руб. (по традиционной технологии – 289 руб.). Годовой

в начальный период второй смены длина стружки увеличивается с 10,24 до 12,41 м (рисунок 14, поз. 1, 3), что обеспечивает показатель проницаемости 190,5 л/ч. У экспериментальных ножей (рисунок 14, поз. 2, 4) после заточки длина стружки увеличивается с 11,51 до 12,78 м, что

экономический эффект при производственной программе 30 тыс. шт. составит 3554 тыс. руб с окупаемостью затрат за 0,1 года. Экономия металла – 1160 т.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе решена актуальная научно-практическая задача повышения долговечности ножей центробежных свеклорезок за счет совершенствования технологии восстановления и упрочнения граней, направленного на обеспечение качества измельчения сахарной свеклы.

2. Обоснованы основные показатели процесса измельчения сахарной свеклы, возникающие от воздействия центробежных и инерционных моментов при перемещении свеклы в ЦС. Силовым анализом рабочего процесса (4) установлена целесообразность увеличения долговечности ножей путем повышения износостойкости и предела выносливости на изгиб.

3. Установлены и исследованы технологические и конструктивные усовершенствования при восстановлении и упрочнении ножей, заключающиеся в устранении деформаций и искривлений граней и создании утолщения дна и высоты под дополнительным углом $\beta_2 = 3^\circ$, обеспечивающим постепенное утолщение от 1 мм у режущей кромки до 2,5 мм к вершине грани (патент № 130942) методом горячего пластического деформирования (патент № 150113).

4. Разработанный технологический процесс с комплектами оснастки для восстановления и упрочнения свеклорезных ножей пластическим деформированием позволил за счет улучшения физико-механических характеристик повысить их долговечность на 27...30 %. Повышение относительной износостойкости режущих кромок (1, 2) и предела выносливости на изгиб (25 %) обеспечило посменное повышение длины стружки на 18...20 % и проницаемости стружки на 16...18 %.

5. Установлены энергосиловые режимные параметры технологического процесса восстановления и упрочнения свеклорезных ножей пластическим деформированием, проведена производственная проверка технологии и оснастки. Годовой экономический эффект от внедрения результатов исследования в производство при годовой производственной программе 30 тыс. шт. ножей составит 3,5 млн руб.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

Использовать разработанные технологии восстановления и упрочнения ножей в системе ремонтно-обслуживающих мероприятий сахарных производств.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

1. Усовершенствовать методику диагностирования разрушения граней ножей с использованием ультразвуковых и виброакустических методов.

2. Разработать рекомендации по повышению качества стружки за счет технического совершенствования процесса измельчения.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Ковылин, А. П. Моделирование процесса осадки поверхности переменного профиля / Ф. Я. Рудик, Л. Ю. Скрябина, А. П. Ковылин // Научное обозрение. – 2011. – № 5. – С. 18–20.

2. Ковылин, А. П. Обеспечение показателей надежности ножей для измельчения сахарной свеклы / Ф. Я. Рудик, Л. Ю. Скрябина, А. П. Ковылин // Научное обозрение. – 2012. – № 6. – С. 160–164.

3. Ковылин, А. П. Технологические особенности обвалки мясного сырья и направления повышение долговечности режущего инструмента / Ф. Я. Рудик, Л. Ю. Скрябина, А. П. Ковылин, В. В. Володин, Т. А. Булеков // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2014. – № 7. – С. 37–41.

4. Ковылин, А. П. Дефектное состояние ножей к центробежным свеклорезным установкам и повышение их усталостной прочности / Ф. Я. Рудик, Л. Ю. Скрябина, А. П. Ковылин // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2014. – № 8. – С. 22–26.

5. Ковылин, А. П. Повышение износостойкости и усталостной прочности режущих инструментов перерабатывающей отрасли / Ф. Я. Рудик, Л. Ю. Скрябина, А. П. Ковылин, В. В. Володин // Вестник машиностроения. – 2014. – № 4. – С. 43–47.

В описаниях патентов

6. Патент на полезную модель 130542 Российская Федерация, МПК В 26 D 1/00. Свеклорезный нож / Рудик Ф. Я., Богатырев С. А., Ковылин А. П., Скрябина Л. Ю., Гумарова А. К., Булеков Т. А. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – № 2013105418 ; заявл. 08.02.2013 ; опубл. 27.07.2013.

7. Патент на полезную модель 150113 Российская Федерация, МПК В 21 Н 7/10. Устройство для изготовления режущего инструмента / Рудик Ф. Я., Богатырев С. А., Ковылин А. П., Попова А. В., Морозов А. А. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – № 2014116686/02 ; заявл. 24.04.2014 ; опубл. 27.01.2015, Бюл. № 3.

В других изданиях

8. *Ковылин, А. П.* Расчеты допустимых размеров деталей переменного профиля / *Ф. Я. Рудик, Л. Ю. Скрябина, А. П. Ковылин* // *Материалы науч.-практ. конф., посвящ. 75-летию проф. А. Г. Рыбалко / ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ».* – Саратов, 2011. – С. 117–119.

9. *Ковылин, А. П.* Особенности строения сахарной свеклы и ее измельчения в стружку / *Ф. Я. Рудик, Л. Ю. Скрябина, А. П. Ковылин* // *Технология и продукты здорового питания : материалы. науч.-практ. конф. / ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ».* – Саратов, 2012. – С. 149–153.

10. *Ковылин, А. П.* Повышение качества свекловичной стружки при производстве сахара путем оптимизации параметров ножа / *А. П. Ковылин* // *Безопасность и качество товаров : материалы. науч.-практ. конф. / ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ».* – Саратов, 2014. – С. 50–54.

Подписано в печать

Формат 60×84/ ¹/₁₆

Бумага офсетная.

Гарнитура Times New Roman

Печ. л. 1,0

Тираж 100

Заказ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова»

410012, Саратов, Театральная пл., 1.