

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет  
имени Н.И. Вавилова»

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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Научный руководитель:**

доктор технических наук,  
профессор Ф.Я. Рудик

Саратов 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 ОСОБЕННОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ И ДЕФЕКТНОЕ СОСТОЯНИЕ НОЖЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СВЕКЛОРЕЗОК ПРИ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ.....	12
1.1 Биологические особенности строения сахарной свеклы .....	12
1.2 Технологические требования к измельчению сахарной свеклы и критериальные оценочные показатели процесса .....	14
1.3 Технические условия обеспечения качества стружки .....	18
1.4 Условия работы, конструктивные особенности и причины потери работоспособности ЦС .....	21
1.5 Дефектное состояние свеклорезных ножей и способы восстановления их работоспособности .....	27
1.6 Анализ и обоснование технологических направлений повышения стойкости инструмента для измельчения сельскохозяйственного сырья пластическим деформированием .....	36
1.7 Программа и структура исследований .....	42
Выводы .....	43
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНЕЙ СВЕКЛОРЕЗНЫХ НОЖЕЙ С ПОВЫШЕННЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ .....	44
2.1 Исследование рабочего процесса измельчения сахарной свеклы в ЦС .....	44
2.2 Исследование процесса измельчения свеклы и обоснование зависимости качественных показателей стружки от состояния режущих кромок и граней ножа .....	52
2.3 Силовой анализ рабочего процесса измельчения сахарной свеклы в ЦС .....	53
2.4 Обоснование конструктивных параметров ножа.....	60
2.5 Обоснование конструктивно-технологических схем повышения износостойкости и предела выносливости на изгиб граней ножа.....	64
2.6 Исследование напряженно-деформированного состояния и схем формообразования при восстановлении и упрочнении граней ножа....	67
2.7 Штамповая и накатная оснастки для восстановления и упрочнения граней ножа .....	71
2.8 Обоснование профиля и параметров граней ножа с повышенным пределом выносливости на изгиб .....	76
2.8.1 Конструктивное повышение выносливости на изгиб граней ножа .....	77

2.8.2 Технологическое обеспечение утолщения дна и вершины граней .....	79
2.8.2.1 Расточка граней сборной фрезерной оправкой .....	79
2.8.2.2 Пластическое деформирование граней накаткой .....	81
Выводы .....	85
<b>3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ</b> .....	<b>86</b>
3.1 Методика исследования процесса штамповки и прокатки при восстановлении и упрочнении граней ножа .....	86
3.2 Методика микрометражных исследований .....	87
3.3 Методика микро- и макроструктурных исследований .....	88
3.4 Методика исследований показателей твердости .....	89
3.5 Методика исследования физических показателей .....	89
3.5.1 Методика исследования остаточных напряжений .....	90
3.5.2 Методика исследования плотности дислокаций .....	91
3.6 Методика ресурсных испытаний .....	92
3.6.1 Испытания выносливости на изгиб .....	92
3.6.2 Испытания на износостойкость .....	93
3.6.3 Производственные испытания .....	95
3.6.4 Методика оценки достоверности зависимости качественных показателей свекловичной стружки от технического состояния ножей.....	96
Выводы .....	98
<b>4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ</b> .....	<b>99</b>
4.1 Обоснование режимов пластической деформации ножей .....	99
4.2 Результаты микрометражных исследований .....	101
4.3 Результаты микро- и макроструктурных исследований .....	103
4.4 Анализ механических показателей упрочнения граней.....	104
4.5 Анализ физических показателей упрочнения граней.....	106
4.6 Исследование показателей, характеризующих ресурсные параметры ножей .....	109
4.6.1 Анализ показателей выносливости на изгиб .....	110
4.6.2 Анализ показателей износостойкости .....	111
4.6.3 Анализ показателей производственных испытаний .....	113
4.7 Критериальность и достоверность результатов исследований .....	119
4.7.1 Анализ износного состояния граней .....	119

4.7.2 Анализ зависимости длины и проницаемости стружки от величины износа длины граней .....	121
4.8 Технологический процесс восстановления и упрочнения ножей к ЦС .....	125
Выводы .....	126
<b>5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ .....</b>	<b>129</b>
<b>ВЫВОДЫ .....</b>	<b>134</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>135</b>
<b>РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ .....</b>	<b>136</b>
<b>ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ .....</b>	<b>136</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>137</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>151</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность проблемы исследования.** Проблема обеспечения продуктами питания связана с резким приростом численности населения. Так, по данным Википедии [1–3], в 1800 г. население Земли составляло 1 млрд чел., в 2000 – 6 млрд, в 2011 – 7 млрд, а к 2100 г. ожидается 10 млрд. Продиктованная данными обстоятельствами необходимость увеличения объемов производства пищевых продуктов несомненна. При ограниченности земельных ресурсов данная проблема может быть решена несколькими путями и прежде всего интенсификацией сельскохозяйственного производства. Однако это направление имеет ограничения. Например, неизвестны последствия создания Китаем, США и некоторыми другими странами генетически модифицированных продуктов, поэтому их использование ограничено, а в России законодательством не допускается.

Развитие в Российской Федерации функционального питания направлено на обеспечение организма человека всеми необходимыми витаминами, минералами, микроэлементами [4], оказывающими позитивное регулирующее воздействие на определенные системы и органы человека, улучшающими физическое здоровье и качество жизни. Данное принципиально новое направление особо актуально по той причине, что при современном уровне развития жизнедеятельности человек резко снизил уровень физического труда и улучшил бытовые условия, что в итоге сократило его энергозатраты [5]. Это в свою очередь привело к необходимости уменьшения общего объема потребляемой пищи, которая должна быть строго сбалансированной по содержанию всех полезных составляющих пищевого сырья.

Следующим значимым моментом является рациональное использование сырьевых ресурсов при их переработке. Повышение эффективности переработки сырья, применение современных технологий и оборудования позволит резко повысить его продуктивный потенциал путем

количественного сокращения нерационально используемых вторичных продуктов.

Сахар является одним из продуктов, обогащающих организм человека углеводами. Его потребляют все слои населения и 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 [6]. Данное обстоятельство говорит о значительных возможностях страны в импортозамещении сахара. В России в настоящее время действует 95 сахарных заводов, для снижения импортных поставок намечается строительство еще 17 новых, в том числе двух заводов в Саратовской области.

Серьезным технологическим недостатком при производстве сахара в России считается низкая степень извлечения сахара из свеклы. Потери при этом составляют 28–30 % и зависят от начальной операции переработки – измельчения свеклы в стружку.

Массоотдача глюкозы и фруктозы целиком зависит от размера и формы измельченных частиц сахарной свеклы, позволяющих при соблюдении особых условий обеспечить рациональную гидродинамическую обработку в диффузионном аппарате с минимизацией потерь сахарозы.

Основными элементами в центробежной свеклорезке, регламентирующими качество стружки, являются свеклорезные ножи. Жесткие условия работы ножей в процессе измельчения свеклы вызывают интенсивное затупление режущих кромок и необходимость частых их перезаточек, что ведет к уменьшению длины граней, их деформации и разрушениям.

Затупление режущих кромок ножей наблюдается при непредсказуемой наработке даже в течение одной смены, а это, как правило, в итоге ведет к высоким потерям сахарозы.

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью улучшения показателя долговечности ножей – наработки на отказ, снижения интенсивности отказов и их потока, повышения ресурса, полностью зависящих от износостойкости режущих кромок и прочности граней ножа, что позволит повысить эффективность переработки сахарной свеклы.

Актуальность работы подтверждена также тем, что она соответствует основным направлениям «Комплексной программы развития биотехнологии в Российской Федерации» № 1853п-П8 от 24 апреля 2012 г. в области активного использования вторичных продуктов переработки.

Цель исследований и их результаты также соответствуют приоритетным направлениям развития Саратовского госагроуниверситета: № 01201151795 «Модернизация инженерно-технического обеспечения АПК» и № 01201151793 «Ресурсосберегающие технологии безопасных пищевых продуктов».

**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. Требуются 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 путем восстановления и упрочнения граней и режущих кромок 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 граней на изгиб.

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 горячего пластического деформирования.

**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 проницаемостью, от посменного износного состояния режущих кромок и долговечности ножей;
- разработана штамповая и прокатная оснастка, выполнена ее производственная проверка и оценка эффективности измельчения сахарной свеклы восстановленными и упрочненными ножами.

**Методология и методы исследования.** Методологической основой 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, восстановленных и упрочненных 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.

**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 и уменьшением длины граней.

**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» (г. Саратов, 2011, 2012, 2013 гг.);

– на Международных научно-практических конференциях «Технология и продукты здорового питания» (ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ», г. Саратов, 2011, 2012, 2013 гг.);

– на Международной научно-практической конференции «Научные проблемы, технического сервиса» (ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии РФ, г. Москва, 2013г.);

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

– на ежегодных аттестациях аспирантов и соискателей ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ» (2012, 2013, 2014 гг.).

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, получены 2 патента на полезные модели.

Диссертация состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка литературы из 154 наименований, из них 5 на иностранных языках. Работа изложена на 150 страницах, содержит 62 рисунков и 14 таблиц. Приложения представлены на 61 странице.

# **1 ОСОБЕННОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ И ДЕФЕКТНОЕ СОСТОЯНИЕ НОЖЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СВЕКЛОРЕЗОК ПРИ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ**

## **1.1 Биологические особенности строения сахарной свеклы**

Все перерабатывающие технологии, связанные с производством пищевых продуктов из растениеводческого сырья, с целью упрощения процесса и повышения эффективности выделения необходимых для производства пищевого продукта полезных составляющих основаны на операциях его измельчения [8].

Биологическое строение каждого вида продукта растениеводства специфично, что требует индивидуального подхода к исследованию процесса измельчения и его технического обеспечения. Первые публикации в этом направлении зарегистрированы более 200 лет тому назад (работы зарубежных ученых – Magey, 1780; Selenger, 1896; К. Honda, К. Takahazi, 1927; G. Scherwitz, 1932, и др.). В последующем данное направление получило развитие в трудах отечественных ученых, прежде всего В.П. Горячкина [9], Г.И. Бремера, В.А. Желиговского, Г.И. Новикова, Е.И. Резника, Е.С. Босого и др. [10–17].

По ботанической классификации сахарная свекла принадлежит к семейству маревых [18]. В ее корне заложены концентрические кольца проводящих пучков. Между кольцами проводящих пучков залегает рыхлая паренхимная ткань, поднимающаяся снизу вверх. Нисходящий ток органических веществ, поступающих в корнеплод, откладывается преимущественно в виде сахаров в сосудисто-волокнистых пучках. Чем больше колец и чем гуще они расположены, тем больше в них свекловичного сока [19–22].

Особое биологическое строение паренхимной клетки (рисунок 1)

вызывает определенные затруднения при высвобождении свекловичного сока с растворенной в нем сахарозой.

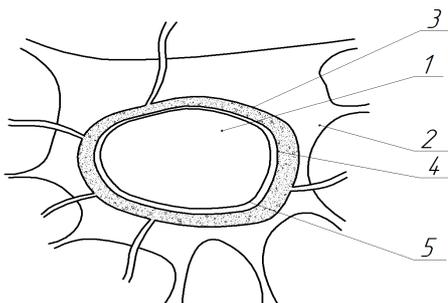


Рисунок 1 – Строение клетки паренхимной ткани сахарной свеклы

Клетка устроена таким образом, что вакуоль 1 (см. рисунок 1), заполненная свекловичным соком, закрыта клеточными стенками пектоцеллюлозной оболочки 2, липопротеидной мембраны 3, цитоплазмы 4 и плазмодесмы 5. Проницаемость клеточных стенок крайне низка и зависит от проницаемости протоплазмы. В свою очередь, протоплазма является полупроницаемой перегородкой, обладающей избирательной способностью пропускать воду и не пропускать растворенные в ней вещества. Растворенный в свекловичном соке свекловичный сахар  $C_{12}H_{22}O_{11}$  является дисахаридом, образующимся из остатков альфа-глюкозы и бета-фруктозы. В кислой среде сахароза гидролизуется и распадается на глюкозу и фруктозу (рисунок 2):

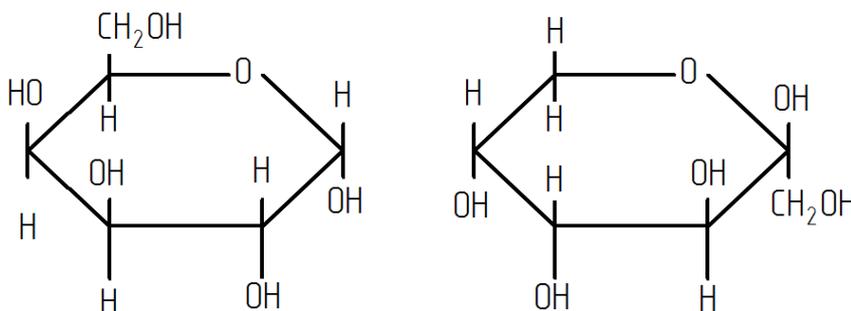
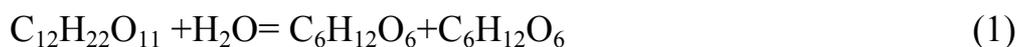


Рисунок 2 – Гидролиз сахарозы в кислой среде

Сахароза и фруктоза, растворенные в жидкости, являются включениями, их проникновение сквозь протоплазму с жидкостью биологически

неосуществимо. По этой причине измельчение свеклы необходимо вести путем частого продольно-поперечного измельчения вакуолей, что дает возможность максимального извлечения из них сахарозы.

Из сказанного можно сделать выводы:

– в количественном соотношении высвобождение свекловичного сока при переработке сахарной свеклы осуществимо только путем ее частого продольно-поперечного измельчения;

– необходимо создать условия для максимально возможного выхода дисахарида, растворенного в воде, из стенок паренхимной клетки.

## 1.2 Технологические требования к измельчению сахарной свеклы и критериальные оценочные показатели процесса

Вертикальное строение кольцевых проводящих пучков обусловило необходимость технического обеспечения условий для активного высвобождения вместе со свекловичным соком дисахарида для получения диффузионного сока. Как было установлено, для достижения этой цели важно обеспечить биологически и технически обоснованное частое продольно-поперечное изрезание вакуолей.

Наиболее рациональными схемами измельчения свеклы признаны технологии, обеспечивающие прямоугольную или ромбовидную форму стружки (рисунок 3).

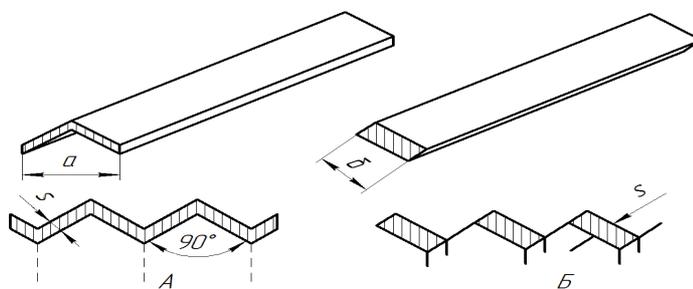


Рисунок 3 – Параметры свекловичной стружки:

*A* – ромбовидная; *B* – прямоугольная

При этом установлены рациональные размеры стружки:

- толщина стружки:  $s = 0,0005$  м;
- для ромбической формы:  $a = 2,5–3,0$  мм;  $s = 1,2–1,5$  мм;
- для прямоугольной формы:  $b = 4–6$  мм;  $s = 0,7–1,0$  мм.

Это объясняется необходимостью обеспечения технологически важного показателя качества стружки, характеризуемого ее длиной, приходящейся на 100 г навески. Наиболее рациональной считается длина стружки 11–14 м. Отношение площади поперечного сечения стружки к периметру должно находиться в пределах  $(1,5...1,7) \cdot 10^{-3}$  м. Соблюдение вышеуказанных параметров непосредственно воздействует на проницаемость клеток (рисунок 4).

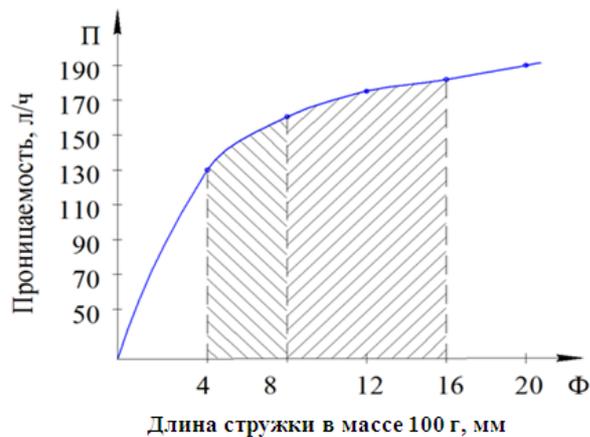


Рисунок 4 – Проницаемость стружки в зависимости от ее длины

Из рисунка 4 следует, что количественный показатель выхода сахарозы, растворенной в свекловичном соке, находится в прямой зависимости от измельченного состояния свеклы, характеризуемого как качество стружки. Следовательно, соблюдение размерных параметров стружки ромбовидной или прямоугольной формы и ее проницаемости, обуславливающей количество проникающей сквозь стенки паренхимной ткани жидкости с растворенной в ней сахарозой, является основой рентабельности сахарного производства.

В свою очередь, качество стружки, получаемое в центробежной свеклорезке при соблюдении технических и технологических условий, зависит только от технического состояния свеклорезного ножа, так как

только его размеры и состояние режущей поверхности обеспечивают оптимальные длину и проницаемость стружки.

На основании данных графика (см. рисунок 4) и литературных источников определено, что в установленном оптимальном интервале длины стружки в 100 г навески, составляющем 11–14 м, ее проницаемость составляет 170–180 л/ч. При этом потери сахарозы не превышают 2–5 %, что допустимо.

Данные параметры обеспечиваются в начальный период работы ЦС за счет соответствия остроты режущих кромок, длины и высоты граней режущей части ножа (в последующем в тексте «грани»). Однако по мере работы ЦС и постепенного изнашивания режущая кромка ножа затупляется, изменяется характер измельчения. Процесс резания происходит с ощутимым воздействием упругой деформации свеклы, что ведет к отклонениям от оптимальной толщины стружки, которая должна составлять 0,0005 м. По причине данных изменений длина стружки уменьшается до 8–10 мм, ее проницаемость ухудшается на 20–22 %. Установлено, что к концу смены процесс изнашивания интенсифицируется, что напрямую связано с состоянием режущей кромки, резко изменяется процесс резания, длина стружки при этом находится в пределах 4–8 м, а проницаемость достигает 90–120 л/ч, снижаясь на 28–30 %.

Зависимость проницаемости стружки от ее качества при наработке ЦС в одну смену приведена на рисунке 5.

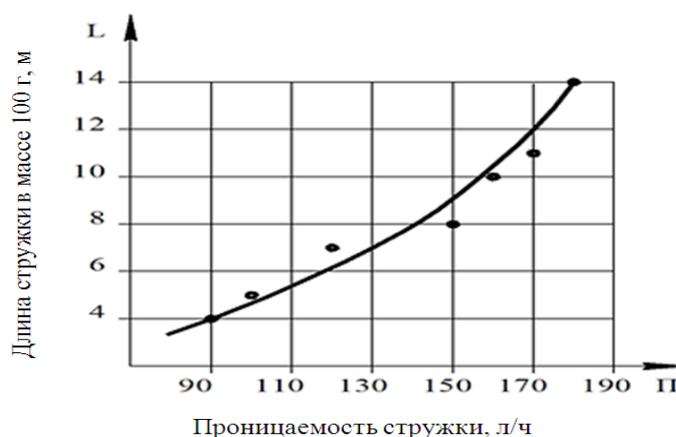


Рисунок 5 – Зависимость проницаемости стружки от ее длины при односменной наработке

Анализ рисунка 5 показывает, что качество стружки, от которого зависит

выход сахарозы из свекловичного сока, при односменной наработке изменяется от оптимального в начале смены и до предельно допустимого, достигаемого к концу смены.

Учитывая то, что основной составной частью ЦС, рассматриваемой при анализе видов, последствий и критичности отказов [23–26], не подлежащей дальнейшему разукрупнению, является нож, обеспечивающий и процесс измельчения, и его качество, в работе принято, что отказ системы регламентируется его наработкой по конструктивному признаку изменения качества перерабатываемого сырья.

В этой связи для анализа видов, последствий и критичности отказов поставлены следующие задачи:

- выявление возможных видов отказов составных частей ЦС, 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, оценку эффективности ранее проведенных доработок.

В качестве основных принципов анализа приняты:

- сочетание качественного анализа видов и последствий отказов объекта с количественными оценками выявляемых отказов, возможных или наблюдаемых при эксплуатации;
- проведение предварительной количественной оценки и ранжирования выявленных наблюдаемых отказов объекта по тяжести их последствий с целью определения необходимости дальнейшего углубленного анализа их критичности и очередности проведения соответствующих доработок объекта, технологии его изготовления, системы технического обслуживания и ремонта;
- оценка влияния отказа на качество функционирования объекта и

полноту выполнения им назначенных функций, возможный материальный ущерб, обусловленный снижением качества функционирования объекта или невыполнением им определенных функций.

Отказы ножей ЦС по тяжести последствий относятся к частым критическим отказам «А» категории III, а по частоте проявлений – к наблюдаемым постоянно.

### **1.3 Технические условия обеспечения качества стружки**

В производстве применяют свеклорезки трех типов – центробежные, барабанные и дисковые. Принципиальным отличием между ними является встречное перемещение свеклы и ножа. Конструктивные особенности [19]:

- в центробежных свеклорезках ножи закреплены на неподвижном цилиндре; свекла раскручивается улиткой и под действием центробежной силы отбрасывается к цилиндру, прижимается к ножам и под действием инерционной силы измельчается;

- в барабанных свеклорезках ножи размещены на стенках вращающегося барабана, расположенного горизонтально; свекла прижимается к ножам прижимом и измельчается;

- в дисковых свеклорезках ножи закреплены на вращающемся диске; свекла, находящаяся в неподвижном состоянии на диске, измельчается за счет инерционной силы.

Конструктивные отличия свеклорезок обуславливают их технико-технологические показатели [24], приведенные в таблицах 1 и 2.

Из таблицы 1 следует, что приспособленность центробежных свеклорезок к условиям сахароперерабатывающих предприятий значительно выше. Скорость резания переменна, что позволяет изменять ее при измельчении свеклы разной сортности, твердости (зависящей от климатического периода – ранняя осень, поздняя осень, зима). Имеется возможность регулировать количество подаваемого в цилиндр сырья, обусловленное насыпной емкостью. За счет

интенсивного инерционного перемещения корнеплода по режущим кромкам ножей, создаваемого улиткой с частотой вращения  $90 \text{ мин}^{-1}$ , у центробежных свеклорезок значительно выше конструктивный коэффициент, обуславливающий частоту хаотичного продольно-поперечного измельчения свеклы. Это является основной предпосылкой получения высоких показателей проницаемости паренхимной ткани.

Таблица 1 – Основные конструктивные параметры свеклорезок

Тип свеклорезной установки	Скорость резания, $v$ , м/с	Насыпная плотность свеклорезки $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Конструктивный коэффициент $K_k$	Эксплуатационный коэффициент $K_s$	
				при резервной свеклорезке	без резервной свеклорезки
Центробежная	6,7...9,6	550...600	0,90	0,90	0,85
Дисковая	8,0	550	0,85	0,90	0,80
Барабанная	7,4	550	0,50	0,90	0,80

Таблица 2 – Удельное усилие резания стружки

Форма стружки	Длина стружки в 100 г навески						
	7...8	9...10	11...13	14...16	17...21	22...27	28..34
Ромбовидная	1770	1570	1420	1330	1230	–	–
Прямоугольная	–	–	–	1080	981	882	784

Вследствие перечисления особенностей, центробежные свеклорезные установки получили преимущественное использование на сахарных заводах.

Форма и размеры свекловичной стружки имеют решающее значение при оценке показателя проницаемости. Наибольшее распространение получили ромбовидная и прямоугольная формы стружки (см. таблицу 2).

Учитывая вертикальное строение кольцевых проводящих пучков корнеплода, достижение максимальной проницаемости возможно за счет частого хаотичного продольно-поперечного изрезывания свеклы с толщиной стружки 0,0005 м.

В случае измельчения свеклы с получением стружки прямоугольной формы возможно изрезание с определенным направлением проводящих пучков (рисунок 6, а, б, в).

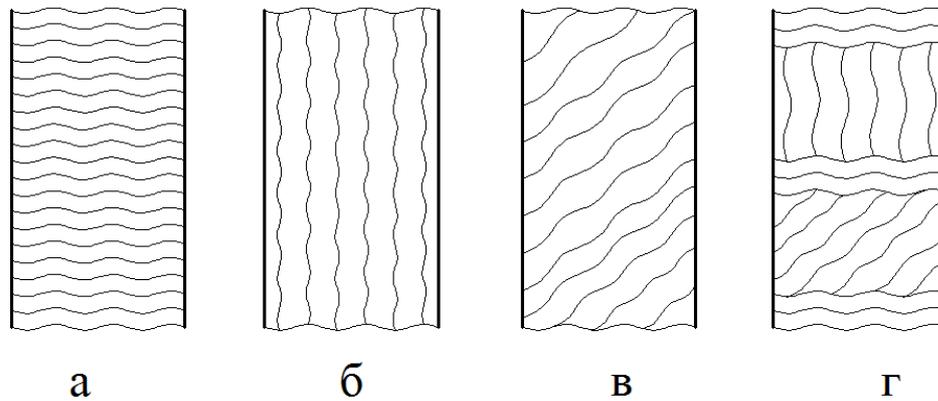


Рисунок 6 – Изрезание кольцевых проводящих пучков свеклы:

а, б, в – прямоугольная форма; г – ромбовидная форма

При прямоугольном измельчении свекла, расположенная в цилиндре, попадает на режущую кромку ножа любой из своих сторон, при этом (см. рисунок 6, а, б, в) может произойти поперечное, продольное и наклонное изрезание проводящих пучков, что в целом ухудшает проницаемость стружки. Для обеспечения максимальной проницаемости необходимо постоянное хаотичное продольно-поперечное измельчение (см. рисунок 6, г), что возможно только при использовании зигообразных ножей ромбовидной формы.

Однако, как следует из таблицы 2, техническое состояние ножей с ромбовидной зигообразной формой режущих кромок быстро ухудшается. Интенсивный процесс изнашивания и повышенная величина износа ведут к затуплению режущих кромок и, соответственно, к увеличению удельного давления свеклы на нож на 35–40 %. Это отрицательно сказывается на показателе качества стружки. Наряду с измельчением стружка по краю среза деформируется, что перекрывает и закупоривает отверстия в стенках паренхимной клетки.

Вместе с этим процесс измельчения сопровождается упругой

деформацией ткани свеклы, срез становится рваным и стабильность толщины стружки нарушается.

Все приведенное подтверждает целесообразность установления оценочных критериальных показателей технического состояния ножей в процессе эксплуатации: качества стружки, ее длины и проницаемости. Техничко-технологическими параметрами, характеризующими долговечность ножа, должны служить показатели состояния режущей кромки, величины износа длины грани ножа, длины стружки в 100 г навески и ее проницаемости, а оценочным критерием – наработка на отказ по качественному признаку стружки.

Принципиально важными при этом являются конструктивно-технологические направления, призванные повысить износостойкость и предел выносливости на изгиб граней и режущих кромок ножей.

#### **1.4 Условия работы, конструктивные особенности и причины потери работоспособности ЦС**

Центробежные установки получили наибольшее распространение ввиду своей конструктивной простоты и высокой производительности (рисунок 7).

Измельчаемая свекла *1* поступает в неподвижный цилиндр *2* с закрепленными в нем 9, 12 или 16 двухножевыми рамками *3*, раскручивается улиткой *4* и под действием центробежных сил прижимается к ножевым рамкам, продвигается по стенкам вдоль граней ножей и измельчается. Далее стружка перемещается в диффузионный аппарат.

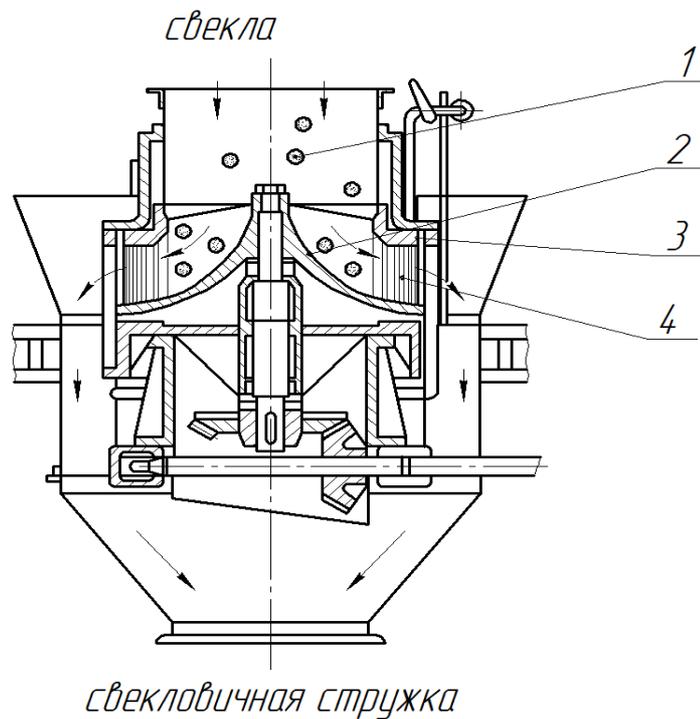


Рисунок 7 – Измельчение сахарной свеклы в стружку  
в центробежной свеклорезной установке:

- 1 – корнеплод; 2 – цилиндр;  
3 – двухножевые рамки; 4 – улитка

Конструктивно измельчение сахарной свеклы в центробежной установке представляет собой рубящий наклонный процесс с элементами скользящего. Работа резания при этом затрачивается на создание упругой и пластической деформации ткани свеклы, а также на преодоление сил трения пары «нож – свекла».

Свекла, представляющая собой сложный биологический объект, в силу своего строения тверда, а в пору технологической спелости стенки паренхимной ткани имеет еще и одревесневшую структуру. Плотность свекловичной мякоти достаточно высока и составляет  $1000 \text{ кг/м}^3$ . Следовательно, удельные усилия резания значительны и находятся в пределах  $1230 \dots 1770 \text{ Н/м}$ , а в случае измельчения свеклы из промерзших кагатов усилия возрастают в разы [19].

Как отмечено ранее, выход свекловичного сока с растворенной в нем сахарозой зависит только от процесса измельчения свеклы, качества

получаемой свекловичной стружки, обеспечиваемого конструктивными особенностями и техническим состоянием ножа.

Конструкция преимущественно используемого в настоящее время ножа (рисунок 8) полностью приспособлена для получения стружки с установленными параметрами (форма, толщина и длина).

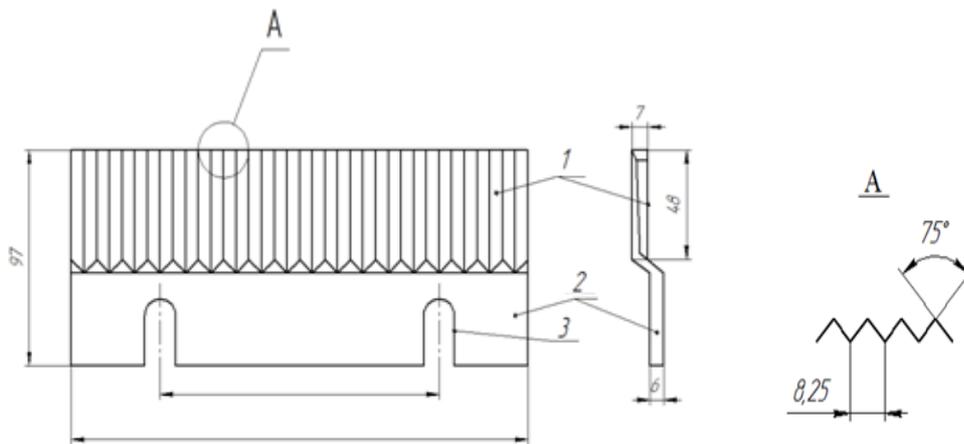


Рисунок 8 – Конструкция ножа центробежной свеклорезки:

1 – режущая плоскость; 2 – рабочая часть ромбовидной формы;

3 – привалочная установочная плоскость

Свеклорезные ножи (см. рисунок 8) представляют собой зигообразную режущую плоскость 1 с ромбовидными гранями. При инерционном контакте измельчаемой свеклы в центробежной свеклорезке за счет заостренной режущей кромки обеспечивается частое и хаотичное продольно-поперечное изрезание корнеплода. Ножи смонтированы в ножевой рамке, закрепленной на неподвижном цилиндре установки посредством крепежных пазов 3. В каждой рамке находятся два ножа, а количество рамок в ЦС зависит от производительности и составляет 9, 12, 16 шт.

Нагрузка, приходящаяся на режущие грани ножей, носит достаточно сложный характер и возникает от ударных воздействий свеклы массой 0,35–0,5 кг на плече от оси улитки до стенки неподвижного цилиндра, равном 0,7 м. Частота вращения улитки 90 мин<sup>-1</sup>. Исходя из этого, разрушение режущих кромок и граней ножей можно классифицировать

как процесс изнашивания при резке свеклы и усталостного разрушения, протекающего от циклического ударного ее воздействия на плоскость граней. Износ режущих кромок зависит от износостойкости материала и устраняется путем перезаточек, количество которых зависит от параметра вылета режущих кромок. Однако, как показали исследования, большая часть ножей (35 %) обладают малой выносливостью на изгиб при симметричном цикле нагружения [25].

Цикличность нагружений зависит от конструктивных особенностей центробежной свеклорезки и прежде всего от ее производительности [26].

Основные конструктивно-технологические параметры центробежной свеклорезки для резки сахарной свеклы и ее технические показатели представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Конструктивно-технологические параметры центробежной установки

Параметр	Обозначение	Ед. измерения	Величина
1	2	3	4
Число ножей в ножевой рамке	$n_1$	шт.	2
Число ножевых рамок	$n_2$	шт.	9; 12; 16
Число ножей в установке	$n_3$	шт.	18; 24; 32
Длина режущей кромки одного ножа	$l_1$	м	0,135
Общая длина режущих кромок ножа	$l_2$	м	2,43; 3,14; 4,32
Высота подъема ножа в свеклорезке	$a$	м	0,0005
Скорость резания	$v$	м/с	6,59
Насыпная емкость свеклорезки	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	550–600
Конструктивный коэффициент, учитывающий степень использования насыпной емкости в свеклорезке	$K_k$		0,9

1	2	3	4
Эксплуатационный коэффициент, равный продолжительности работы свеклорезки с учетом продолжительности остановок ко времени в сутках	$K_3$		0,9
Диаметр корпуса свеклорезки	$D_B$	м	1,4
Частота вращения улитки в свеклорезке	$N_u$	мин <sup>-1</sup>	90
Масса корнеплода	$m$	кг	0,3–0,5
Радиус резания (плечо от центра улитки до стенки неподвижного цилиндра)	$R$	м	0,7
Удельное усилие резания, зависящее от плотности свеклы и желобчатой формы стружки при ее длине 7–8 м на 100 г	$f$	Н	1770
Коэффициент, учитывающий неоднородность вороха свеклы в свеклорезке	$\eta_{отн}$		0,512–0,6
Коэффициент трения скольжения свеклы о сталь	$\mu$		0,175

При работе ЦС раскрученная улиткой свекла перемещается к неподвижной стенке цилиндра с закрепленными на ней по всему диаметру ножами. При этом ножи воспринимают ударные нагрузки на грань и нагрузки, приходящиеся на инерционное перемещение корнеплода по режущей кромке (рисунок 9).

В соответствии с конструктивными особенностями грани свеклорезного ножа при измельчении свеклы находятся в относительно свободном состоянии, так как расстояние от места их крепления до режущих кромок граней составляет 70 мм.

Грани толщиной 0,8–1,0 мм и длиной 48 мм легко возбудимы колебательными движениями, возникающими от каждого очередного удара корнеплода, раскрученного улиткой, о режущую часть. При этом от удара корнеплода о грани ножа при незначительной жесткости на плече от оси

улитки до стенки неподвижного цилиндра возникает усилие  $P_1$  и от противодействия ударному воздействию –  $P_2$ . Возбуждаемые ударные воздействия вызывают постоянные колебания граней ножа, что свидетельствует о достаточно интенсивном изгибном усталостном характере их работы и процессе разрушения.

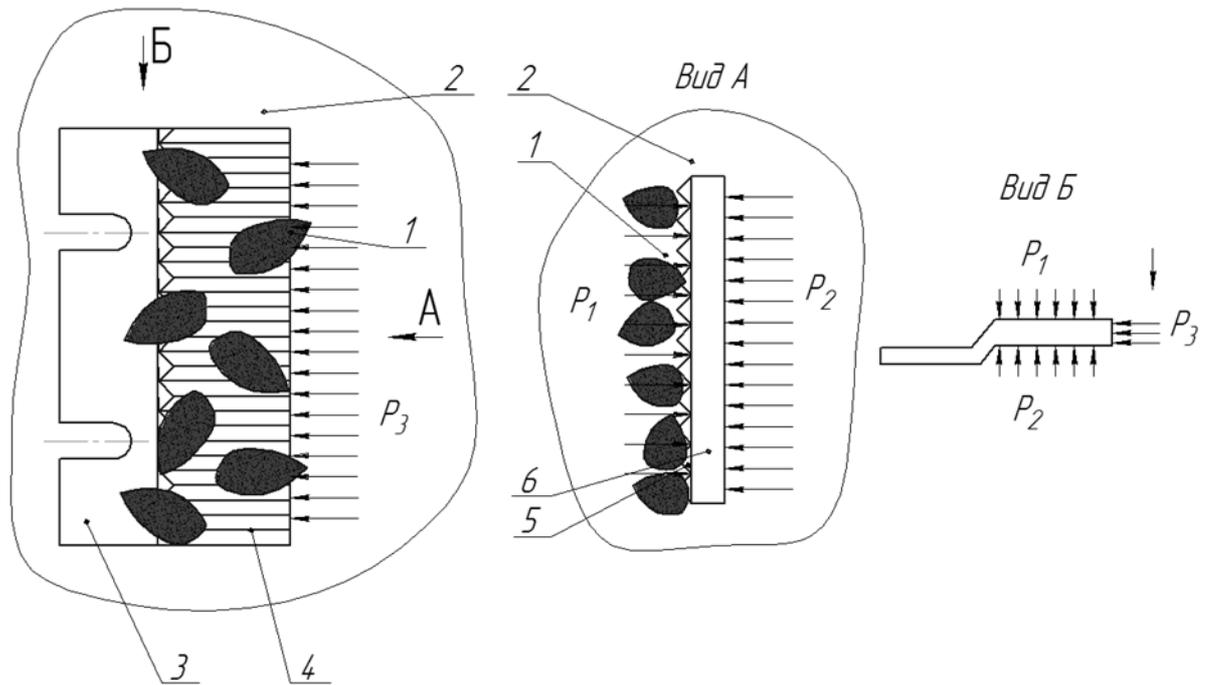


Рисунок 9 – Процесс взаимодействия корнеплода с ножом при измельчении:

- 1 – измельчаемая свекла; 2 – неподвижный цилиндр установки;
- 3 – привалочная наружная плоскость ножа; 4 – грани ножа;
- 5 – режущие кромки ножа; 6 – полость схода стружки

При продвижении корнеплода по неподвижной цилиндрической поверхности в процессе измельчения возникает нагрузка  $P_3$ , порождающая усилие для преодоления силы трения свеклы о режущие грани ножа.

Исходя из конструкции свеклорезки, разовая насыпная вместимость цилиндра, зависящая от формы, размеров и массы свеклы, составляет 550...600 кг/м<sup>3</sup>. Расчетами установлено, что при однократном заполнении цилиндра свеклой в установке находится от 1465 до 1600 корнеплодов. В

свеклорезке с девятью ножевыми рамками каждый из 18 ножей разово воспринимает от 82 до 89 ударных воздействий. Такое же число корнеплодов попадает и на режущую кромку и измельчается об нее.

Учитывая то, что загрузка цилиндра осуществляется непрерывно, то есть измельченная свекла дополняется новой, количество измельчаемой свеклы в сутки возрастает многократно, и это должно вести только к интенсификации процесса изнашивания ножа и, соответственно, к уменьшению показателя безотказности по установленному ранее качественному критерию функционирования объекта и полноты выполнения им назначенных функций.

### **1.5 Дефектное состояние свеклорезных ножей и способы восстановления их работоспособности**

Конструктивно свеклорезный нож должен обеспечить получение технологически обоснованной стружки ромбовидной или прямоугольной формы, что является оптимальным для экстрагирования свекловичного сока. При этом обеспечивается повышенная скорость обессахаривания свекловичного сока, создаются условия высокой проницаемости слоя паренхимной ткани.

Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что качество свекловичной стружки функционально обусловлено техническим состоянием свеклы  $T_{c.c.}$ , зависящим от сорта, условий выращивания, уборки и хранения корнеплодов, конструктивного совершенства установки для измельчения свеклы  $K_{c.n}$  и показателя безотказности ножа  $P_n(t)$  [27, 28]:

$$K_{c.c.} = f(T_{c.c.}; K_{c.n}; P_n(t)). \quad (1)$$

Первая составляющая  $T_{c.c.}$  характеризует качество измельченной стружки только косвенно, с позиции возможности измельчения устройством свеклы, находящейся в различном техническом состоянии. Это является достаточно

важным фактором обеспечения конструктивно-технических возможностей ножей измельчать корнеплоды различной плотности.

Конструктивное совершенство ножей в данном случае является основным фактором, призванным обеспечить технологичность операции измельчения и высокие показатели долговечности ножа, так как даже при незначительном затуплении и выкрашивании режущей кромки процесс измельчения не приостанавливается, а качество стружки ухудшается, вызывая значительные потери сахарозы.

Из приведенного следует, что наиболее приемлемым для оценки качества измельчения сахарной свеклы следует принять интегральный показатель  $I$ , устанавливающий взаимосвязь эффективности переработки с затратами на создание ножей с высокими показателями безотказности и долговечности и с небольшими эксплуатационными затратами на ремонтно-обслуживающие работы:

$$I = \frac{\sum \Pi}{\alpha(Z_c + Z_3)}, \quad (2)$$

где  $\sum \Pi$  – суммарный положительный эффект от работы центробежной установки, руб.;

$\alpha$  – поправочный коэффициент, зависящий от показателя безотказности ножа;

$Z_c$  – затраты на создание конструктивно совершенного ножа, руб.;

$Z_3$  – эксплуатационные затраты, приходящиеся на ремонтно-обслуживающие работы по устранению отказов и возобновлению работоспособности ножа, руб.

При анализе дефектного состояния ножей установлено, что на их работоспособность воздействуют систематические и внезапные отказы.

Систематические отказы ножей связаны с интенсивным и непрерывным процессом измельчения и, соответственно, изнашивания режущих кромок от измельчаемого корнеплода, их взаимодействия с абразивными частицами,

поступающими извне.

Радиус округления режущих кромок  $R$ , характеризующий их остроту, с увеличением размера при перезаточке повышает отрицательные значения переднего и заднего углов заточки режущих кромок граней, что ведет к возрастанию усилия резания и в итоге – к ухудшению качества стружки. Достаточно незначительного, 10–15%-го увеличения размера округления режущих кромок, чтобы на поверхности стружки начали образовываться вырывы, ворсистость, высокая шероховатость и прочие дефекты, ведущие к затруднению процесса выхода сахарозы из свекловичного сока.

Вопросу изучения дефектного состояния ножей ЦС посвящены работы [29, 30, 35–40]. Однако в них рассматриваются общие вопросы совершенствования процесса измельчения, которые не получили практического использования. Поэтому они не представляют для исследовательской работы ценности, и их анализ представлен в приложении А.

Исследованиями [31, 32] установлено, что основными дефектами ножей являются сколы и смятия граней, изменение их формы, разрушения режущих кромок и др. Однако в данных работах не вскрыты явления, по причинам которых они протекают, хотя общими недостатками ножа являются его низкие стойкость на износ и предел выносливости на изгиб. Предложенная технология поверхностного плазменного упрочнения ножей может повысить лишь твердостные показатели поверхности, а выносливость на изгиб, проявляющаяся в объеме всего ножа и являющаяся также преобладающим дефектным признаком, неизменно низкая.

Торцовку затупленных ножей осуществляют на специальном заточном станке МЗ-375 (рисунок 10).

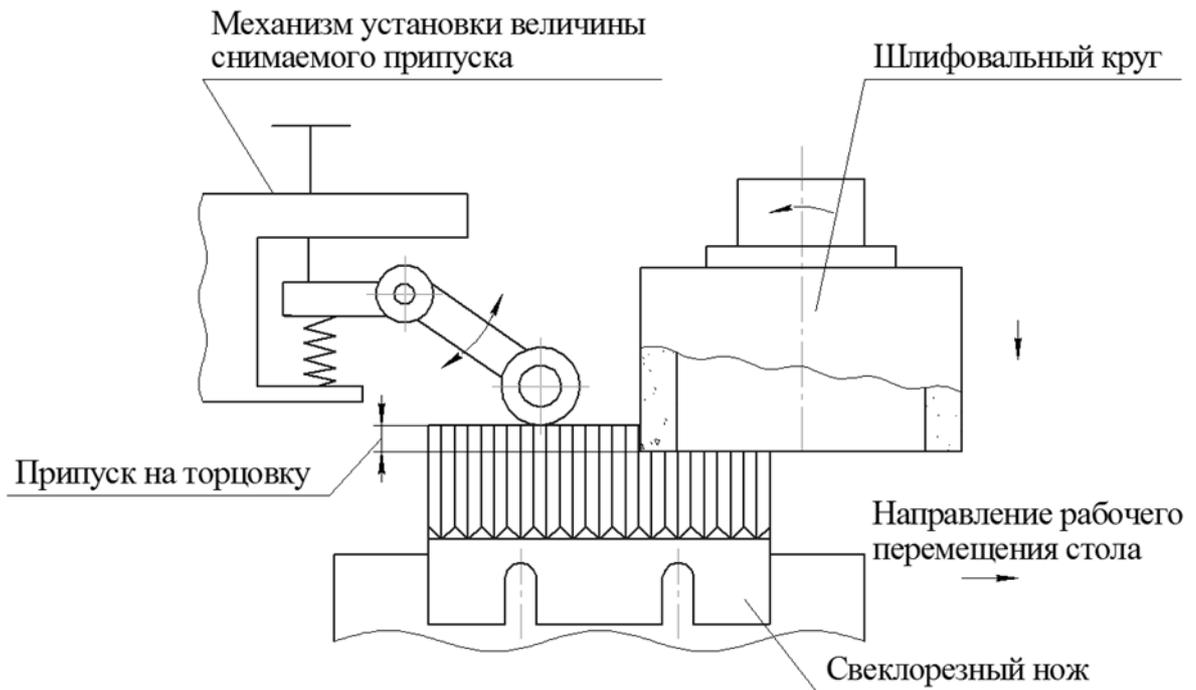


Рисунок 10 – Схема установки для торцевания режущих кромок

Достоинством данного способа восстановления работоспособности ножа, как и всякого режущего инструмента, является возможность его перезаточки. Но, как известно, количество перезаточек зависит от регламентированной длины граней. С учетом того, что при каждой заточке снимается слой металла до 1 мм, количество заточек ограничено и, по литературным источникам, не превышает 4–6.

Следовательно, для увеличения показателя долговечности ножа необходимо повысить износостойкость режущих кромок, что возможно путем изменения марки материала и использования упрочняющей технологии их изготовления.

Для изготовления ножей используют инструментальную углеродистую сталь У7, закаленную до 50 HRC и обладающую мелкозернистой структурой. Толщина сечения грани составляет 0,8...1,0 мм, при закалке происходит сквозное прокаливание [33, 34], что наряду с высоким содержанием углерода

вызывает повышенную хрупкость и разрушения – выкрашивания и вырывы. Такие дефекты ножей перезаточкой не восстанавливаются (рисунок 11).

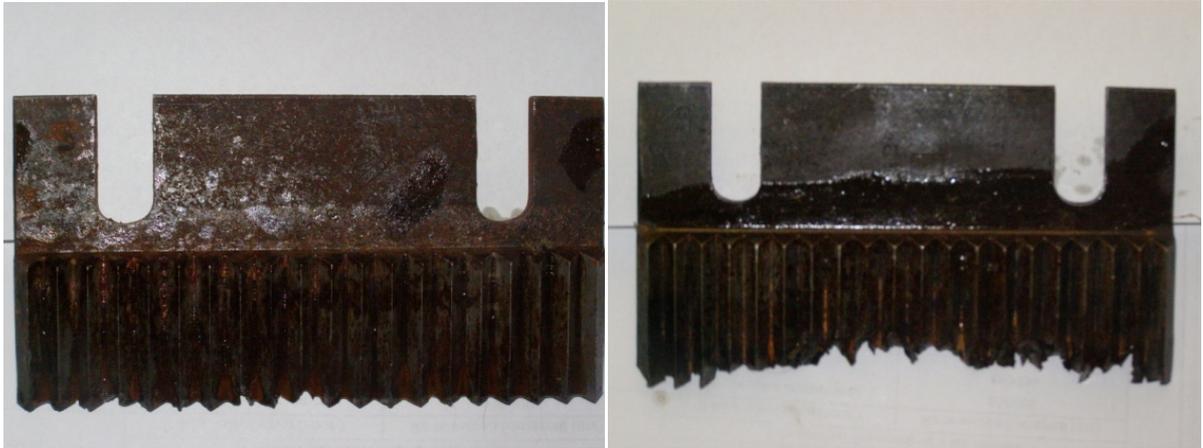
*a**б**в*

Рисунок 11 – Разрушения режущих кромок: *a* – выкрашивание; *б* – вырыв;  
*в* – деформация ромбовидной грани

Вследствие постоянных ударных нагрузок от корнеплодов на грани ножа возникают также дефекты в виде искривлений их плоскости (рисунок 12). Практически все бывшие в употреблении ножи в той или иной мере подвержены данному дефекту. В СКБ НИИ сверхтвердых материалов разработана технология правки искривлений в установке МЗ-37 П (рисунок 13).



Рисунок 12 – Искривления плоскости граней от ударных воздействий свеклы

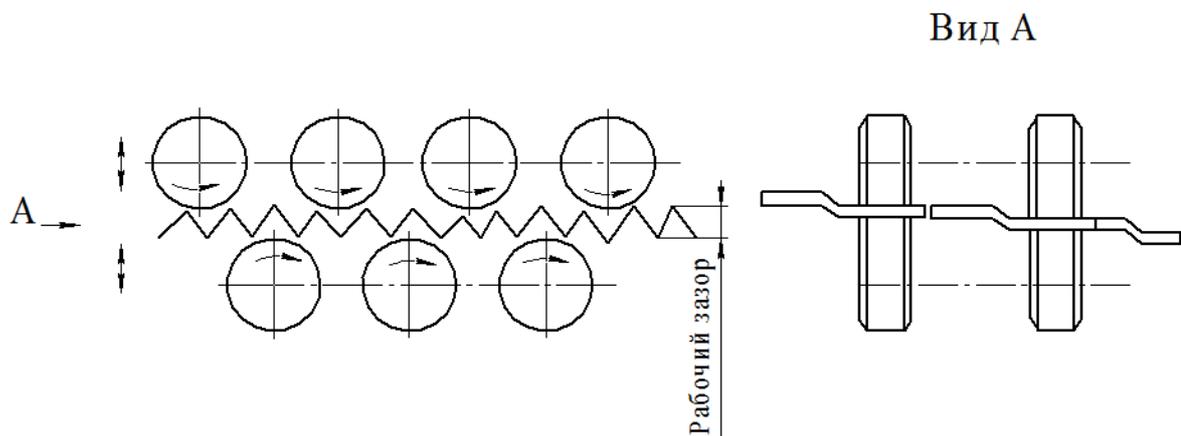


Рисунок 13 – Схема правки ножа в роликовой правящей установке

Искривления в плоскости граней возникают по причине конструктивных особенностей ножа. Плоскость граней (длина 165 мм, ширина 48 мм, толщина 1,0 мм) находится в рамке в свободном незащемленном состоянии. Следовательно, возникающие при работе нагрузки отрицательно воздействуют на предел стали У7 на выносливость при изгибе в симметричном цикле нагружения, составляющем десятки тысяч нагружений в сутки. Усталостные явления в насквозь закаленных гранях при жестких условиях работы сопровождаются возникновением субмикро- и

макротрещин, которые при правящей прокатке искривлений со стрелой прогиба до 20 мм вызывают невозстановливаемые разрушения по длине грани. Данное обстоятельство вызывает местные поломки граней (рисунок 14) и резко снижает показатель долговечности ножа.



Рисунок 14 – Усталостные разрушения ножей, возникающие при стреле прогиба от 10 до 20 мм

При правке ножей со значительной стрелой прогиба возникает смятие острых вершин граней, что служит препятствием качественной заточке фасок режущих кромок. Это ведет к изменению углов заточки и, как следствие, к ухудшению качества стружки (рисунок 15).

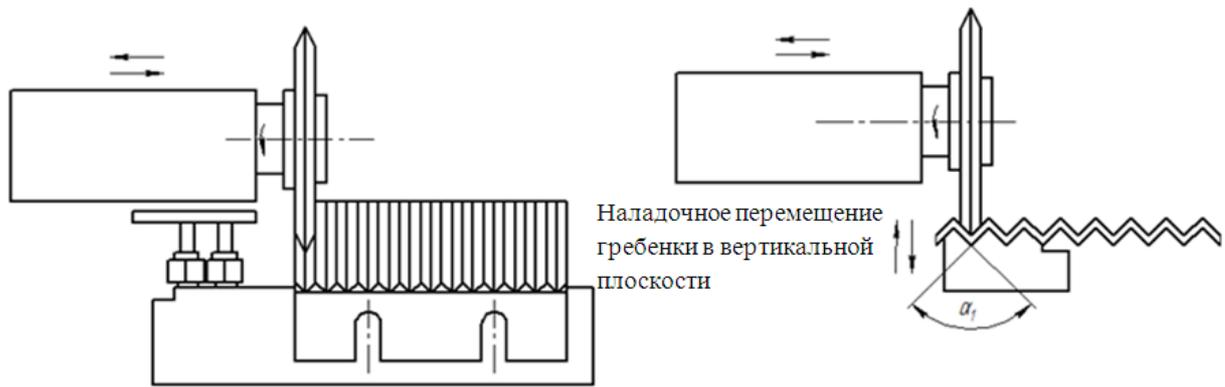


Рисунок 15 – Схема заточки фаски ножа

Таким образом, восстановление работоспособности ножей при эксплуатации затруднено по причине нескольких источников дефектного состояния, наиболее простым и легко устранимым из которых является износ режущей кромки. Все же остальные дефекты связаны с потерей сплошности профиля граней, восстановление которой не представляется возможным.

Для восстановления ножей с искривленной зигобразной поверхностью наиболее приемлемой может быть горячая пластическая деформация в специальной штамповой оснастке.

Оптимальной считается конструкция свеклорезного ножа для отечественных ЦС, используемых по настоящее время, предложенная коллективом авторов (Турик Ю.А., Браницкий В.Н., Козуб А.Н. [40]). Она обоснована с позиций качества получаемой стружки путем изрезывания одревесневших волокон паренхимной клетки (рисунок 16).

Главным конструктивно-технологическим достоинством данных ножей является отсутствие зон защемления изрезываемого материала, со сторон режущей кромки грани открыты, что позволяет получать стружку высокого качества. Наряду с этим наличие двойного угла наклона режущей кромки  $2\alpha = 75...80^\circ$  и  $\alpha_1 = 50...60^\circ$ , а также двойных углов граней  $\beta = 75...80^\circ$  и  $\beta_1 = 4...5^\circ$  обеспечивает условия для внедрения ножа в свеклу и прорезания кольцевых волокон. Работоспособность ножа достаточно велика,

однако имеются и недостатки, при устранении которых возможно повышение показателей безотказности и долговечности.

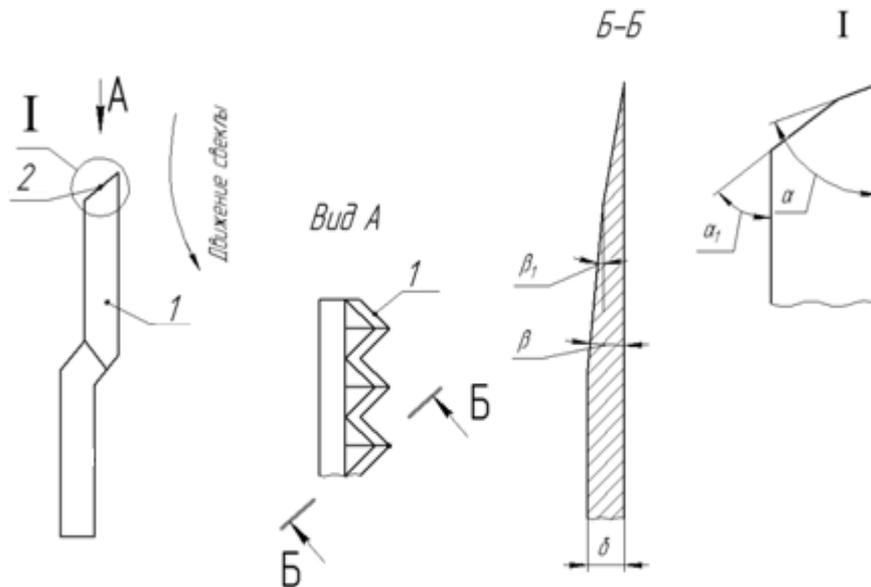


Рисунок 16 – Свеклорезные ножи с зигообразным расположением режущих граней: 1 – грани; 2 – кромка

Во-первых, при работе режущего аппарата свеклорезной установки значительные усилия, возникающие при ударной встрече свеклы и ножа и последующем измельчении, вызывают усталостные разрушения граней. Следовательно, следует считать целесообразным повышение показателя выносливости на изгиб при симметричном нагружении ножа, что может быть обеспечено дополнительными конструктивными изменениями, в частности путем усиления дна и высоты граней.

Во-вторых, ножи обладают невысокой стойкостью к изнашиванию. Как минимум один раз в смену их перезатачивают или заменяют. Это отрицательно сказывается на их показателе наработки на отказ. Следовательно, возникает целесообразность повышения износостойкости ножей путем замены существующей технологии их восстановления и упрочнения фрезерованием режущих граней на упрочняющую технологию пластическим деформированием. Это позволит повысить также и показатель ресурсосбережения при изготовлении ножей.

В-третьих, необходимо заменить углеродистую конструкционную сталь У7, склонную к трещинообразованию, выкрашиванию и поломкам, на износостойкую и коррозионностойкую сталь 30Х13 или 40Х13.

### **1.6 Анализ и обоснование технологических направлений повышения стойкости инструмента для измельчения сельскохозяйственного сырья пластическим деформированием**

Издавна известно, что наиболее предпочтительным является режущий инструмент, упрочненный ковкой или иными методами, предусматривающими пластическую деформацию металла [41–44]. Пластическая деформация при упрочнении деталей основана на принципе изменения формы при постоянной массе деталей.

Металлы относятся к поликристаллическим телам, и на этом основании их механические свойства зависят от величины зерен. Известно, что мелкозернистый материал является более прочным, чем крупнозернистый. Процесс деформации материала при воздействии внешних сил после достижения предела выносливости ведет к пластической деформации зерна. Зерна, имеющие мозаичное строение, при пластической деформации дробятся, и это является основным фактором изменения механических свойств металла. Дислокации, характеризующие искажение кристаллической решетки при пластической деформации, также обуславливают изменения механических свойств материала. Процесс перемещения дислокаций носит краевой характер. С увеличением внешней силы степень смещения возрастает и возникает линейная дислокация, а в случае, если нет преград смещению, дислокации выходят на поверхность и исчезают. При такой деформации процесс упрочнения незначителен, а при ограничении выхода дислокаций на поверхность и их отсутствии в конечный период пластического деформирования возможностей для сдвига будет больше, таким образом, будет иметь место эффективное упрочнение поверхности.

Эти принципы были использованы при разработке технологических процессов и оборудования для изготовления и восстановления режущего инструмента пластическим деформированием с новыми направлениями повышения их прочности.

В Саратовском государственном аграрном университете им. Н.И. Вавилова под руководством профессоров Ю.Д. Пашина, Ф.Я. Рудика, С.А. Богатырева и др. проводились исследовательские работы по восстановлению и изготовлению деталей методами пластического деформирования. Наибольший научно-практический интерес представляют работы, направленные на изготовление и восстановление пластическим деформированием режущего инструмента для перерабатывающей отрасли.

Традиционно ножи для обвалки мяса изготавливали методом продольно-поперечного шлифования клинка из вырубленной из пластины заготовки. При этом предлагались различные технологии, подразумевающие упрочнение ножей, не получившие дальнейшей реализации.

При изготовлении крестовых ножей для промышленных мясорубок используют технологию получения заготовки литьем по выплавляемым моделям [45]. Данная технология достаточно трудо- и материалоемка, она состоит из операций изготовления модели, керамической формы, заливки в нее расплавленного металла, разрушения керамической модели, удаления элементов литниково-питательной системы и механической обработки ножа. Преимуществом данного способа является точность получаемой заготовки, а в качестве недостатков следует отметить дополнительные расходы металла на заполнение литейных отверстий, возможность проникновения воздушных пузырьков в металл и впоследствии возникновения на их месте пустот и раковин, снижающих прочность перьев ножа. Наряду с этим литье по выплавляемым моделям ведет к возникновению крупнозернистой структуры, ведущей в итоге к невысоким показателям износостойкости и прочности.

Существенной разницей технологии, предложенной в работах [46–51], является перевод сложной технологии литья по выплавляемым моделям на

горячую штамповку. Изношенный крестовый нож (рисунок 17), являющийся заготовкой и нагретый до ковочной температуры, устанавливают в штамповую оснастку. За счет направленной деформации пуансона и переноса с нерабочей части 1 металла на изношенные поверхности и формируются в матрице изношенные режущие плоскости 2 (рисунок 18).

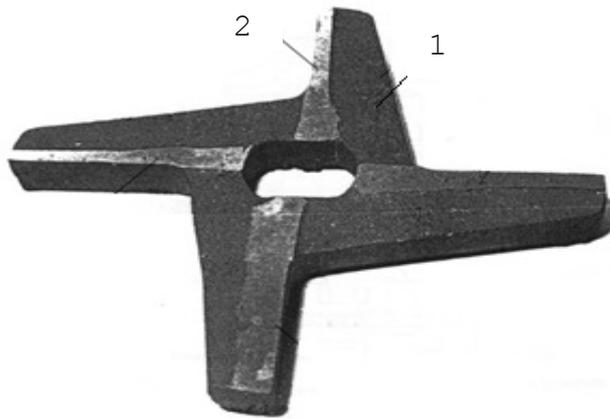


Рисунок 17 – Изношенные режущие плоскости ножей к волчкам

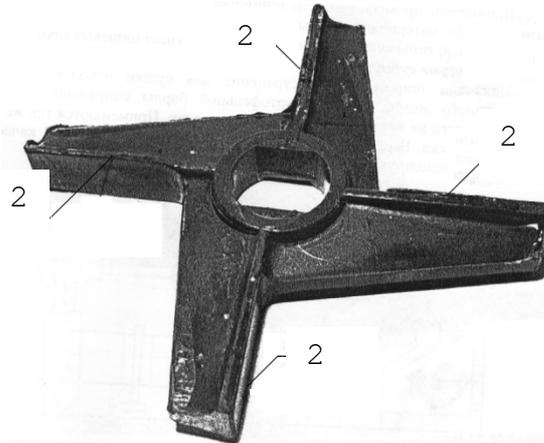


Рисунок 18 – Восстановленные режущие плоскости

Финишной плоскошлифовальной операцией формируются режущие кромки 2 (рисунок 19).

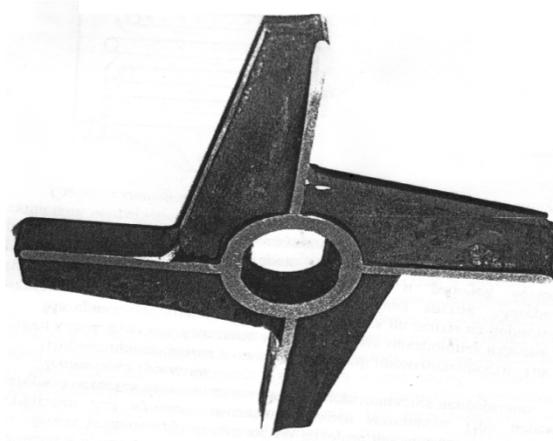


Рисунок 19 – Механически обработанные  
восстановленные режущие кромки ножей  
к волчкам

Металл, необходимый для компенсации изношенного (см. рисунок 16), направленно перемещается с нерабочих зон на восстанавливаемые поверхности (см. рисунок 17). Это обеспечивает восстановление выбракованного ножа и 100%-е ресурсосбережение. Вместе с этим образованная при пластической деформации мелкодисперсная волокнистая структура позволяет за счет повышения износостойкости режущей кромки улучшить показатели безотказности и повысить долговечность ножа на 25 %.

Наиболее близким к исследуемому свеклорезному ножу аналогом является технология формообразования обвалочных ножей прокаткой [52–60].

Наибольшей популярностью у специалистов пользуются кованые ножи. Они обладают повышенными показателями износостойкости и усталостной прочности, но вследствие особенностей, присущих технологииковки, они единичны и изготавливаются по частным заказам.

Традиционно разделочные ножи изготавливают в соответствии с требованиями ГОСТов и СанПиНов [61–63]. Они должны иметь определенные форму, размеры, отвечать антисептическим параметрам и свойствам. При этом общий технологический подход характеризуется вырубкой заготовки ножа из стали У7 с конечным профилем, закалкой заготовки до 40–45 HRC и длительным продольно-поперечным

шлифованием клинка до конструктивно установленных параметров. Технология крайне затратна и непроизводительна, ножи имеют низкие показатели выносливости на изгиб и износостойкость, требуют частых перезаточек и доводки режущей кромки.

Анализ патентных документов показал, что абсолютное большинство работ посвящено чисто конструктивным предложениям.

В частности, в патенте [64] говорится о повышении прочности, надежности и долговечности. Однако не ясно, за счет чего они повышаются (предложено лишь заменить марку стали) и что понимается под повышением надежности и долговечности. Как известно, надежность – это комплексный показатель, одним из свойств которого является долговечность.

В патентах [65, 66] решаются лишь конструктивные параметры, относящиеся к художественному оформлению клинков и «повышению эксплуатационных характеристик и технологичности изготовления». Как решается эта проблема, в описании не указано.

Технология упрочнения обвалочных ножей накаткой, предложенная профессором Ф.Я. Рудиком и доцентом Л.Ю. Скрыбиной [67], заключается в следующем: нагретую до температурыковки заготовку 1 ножа (рисунок 20, а) размещают между двумя деформирующими элементами 2 накатных валков 3. Последние изготовлены со смещенными геометрическими осями  $O$  и  $O^1$ , что позволяет получить при прокатке поперечный клин в заготовке детали, а смещение геометрических осей самих валков 3 дает возможность получить клин в продольном направлении б (рисунок 20, б). Весь процесс прокатки протекает с одной установки. При этом из заготовки 1 (рисунок 21) формируется клинок 2, а из него, в свою очередь, финишной шлифовальной операцией получается готовое изделие 3. На рисунке 21 представлена поэтапная прокатка ножей.

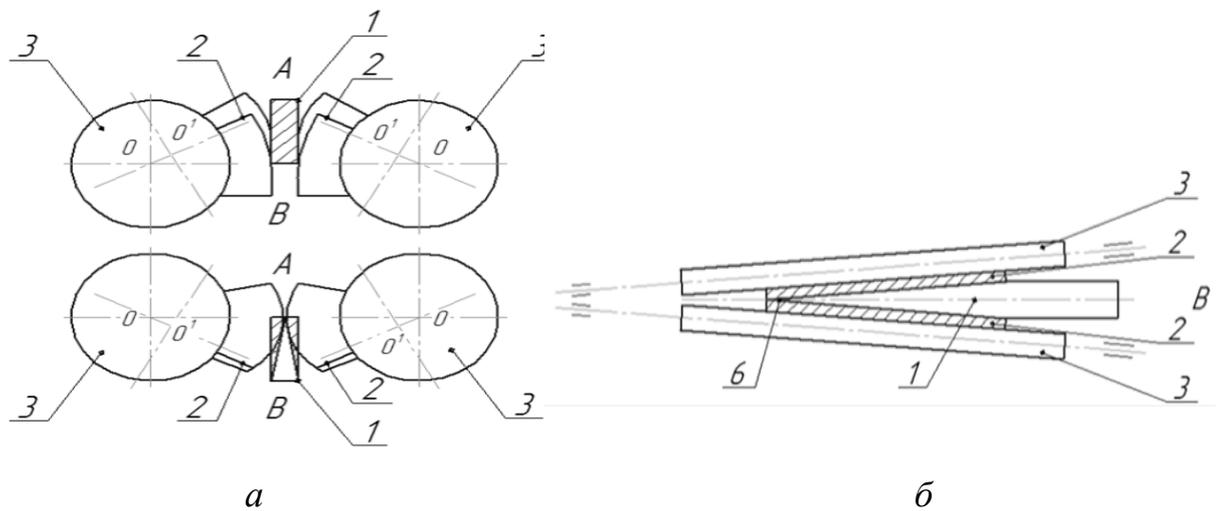


Рисунок 20 – Схема одновременной прокатки клинка в продольном (а) и поперечном (б) направлениях: 1 – заготовка ножа; 2 – деформирующие элементы; 3 – система валов

Наряду с тем, что рассмотренная технология упрочнения обвалочных ножей высокотехнологична с высокой степенью приспособленности к автоматизации процесса прокатки, она обладает еще и значительным коэффициентом использования металла, достигающим до 95 %.

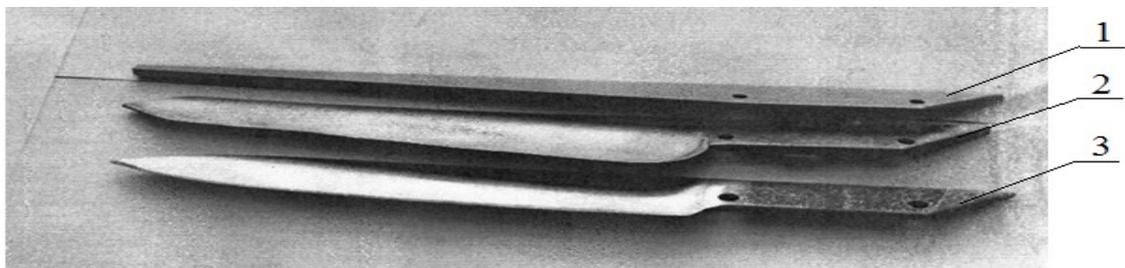


Рисунок 21 – Последовательность изготовления клинков ножей:

1 – заготовка; 2 – поковка; 3 – готовое изделие

Износостойкость режущей кромки ножей возрастает в среднем на 25 % по сравнению с ножами, изготовленными по традиционной технологии, а усталостная прочность – на 30 %.

Из приведенного анализа следует, что для повышения показателя долговечности свеклорезных ножей было бы целесообразно использовать технологию, основанную на пластическом деформировании заготовки.

### 1.7 Программа и структура исследований

На основании приведенного анализа особенностей строения сахарной свеклы, рациональной формы стружки при ее измельчении, анализа причин, порождающих дефектное состояние граней и режущих кромок, и конструктивно-технологических направлений повышения показателя долговечности ножей к свеклорезным установкам определены направления научно-исследовательских работ, представленные в развернутой программе исследований (рисунок 22).



Рисунок 22 – Структура и программа исследований

## Выводы

1. Проанализированы биологические особенности строения сахарной свеклы и особенности извлечения из нее свекловичного сока.

2. Проанализированы и установлены ресурсопределяющие элементы ЦС, зависимость выхода свекловичного сока от технического состояния ножей, определены задачи анализа видов отказов и условий их возникновения и развития.

3. Проанализированы и определены сочетания качественного анализа видов и последствий отказов объекта с количественными оценками выявляемых возможных или наблюдаемых при эксплуатации отказов.

4. Проанализированы и установлены оценочные критериальные показатели технического состояния ножей в процессе эксплуатации, призванные повысить износостойкость режущих кромок и предел выносливости на изгиб граней ножей.

5. Исследованы дефектное состояние ножей, конструктивно-технологические направления повышения показателей долговечности режущего инструмента при эксплуатации, способы восстановления короблений зигобразных плоскостей.

6. Установлены направления конструктивно-технологического совершенствования ножей с повышенными показателями износостойкости и предела выносливости на изгиб.

7. Разработана и представлена структура и программа научно-исследовательских работ, направленных на исследование процессов повышения эффективности измельчения сахарной свеклы в центробежных свеклорезках путем восстановления и разработки режущего инструмента с повышенными показателями износостойкости и выносливости на изгиб.

## **2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНЕЙ СВЕКЛОРЕЗНЫХ НОЖЕЙ С ПОВЫШЕННЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ**

Исследованиями эксплуатационной надежности ЦС установлено, что ее ресурсоопределяющим элементом является нож, часто называемый кенигсфельдским. Его безотказность, характеризующаяся необходимостью частой перезаточки режущих кромок ножа, устранения деформации и потерь прямолинейности режущих граней, выбраковки от усталостных поломок их участков из-за сложности процесса измельчения, низка. Она не обеспечивается даже в период одной смены работы ЦС, т. е. наработки, когда проводится устранение отказов.

По причине высокой интенсивности накопления отказов и ухудшения работоспособности ножей происходит изменение профиля свекловичной стружки [68, 69], что усложняет процесс выделения и вымывания свекловичного сока. Достаточно высокие потери, связанные с качеством стружки, необходимость применения дополнительных операций в технологическом процессе, затраты на восстановление работоспособности и энергозатраты свидетельствуют о целесообразности упрочнения ножа, повышения показателей его долговечности и в целом совершенствования процесса измельчения свеклы.

### **2.1 Исследование рабочего процесса измельчения сахарной свеклы в ЦС**

Центробежные свеклорезные установки получили преимущественное использование в сахарной промышленности. Это объясняется прежде всего высокой их производительностью, непрерывностью измельчения корнеплодов и высокой эффективностью процесса.

Интенсивная трехсменная работа ЦС ограничивается в условиях Российской Федерации 5–6 месяцами. За этот период она полностью

обеспечивает наработку до среднего ресурса, являющегося оценочным критерием долговечности.

Процесс измельчения сахарной свеклы в ЦС изучали по схеме, представленной на рисунке 23.

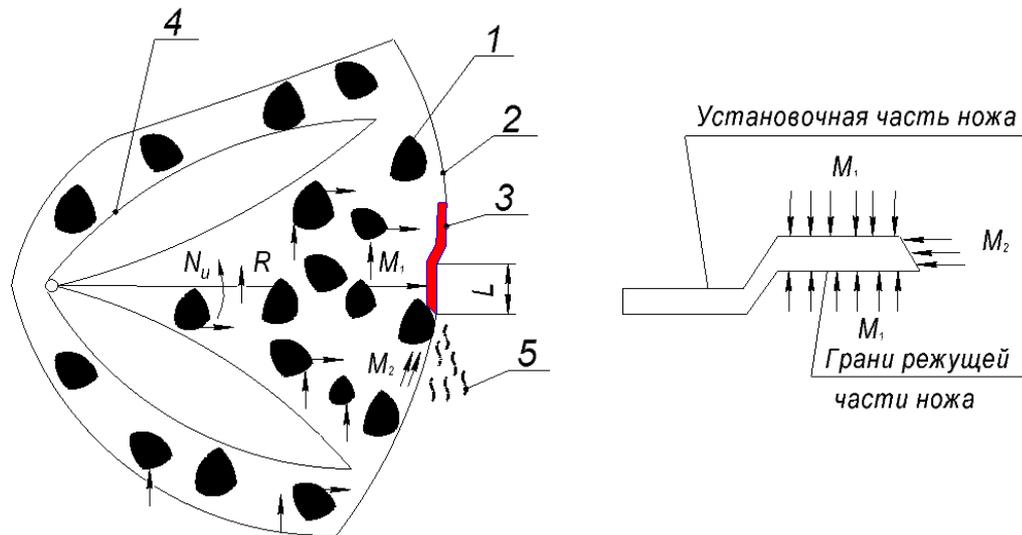


Рисунок 23 – Схема процесса измельчения свеклы в ЦС:

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

Корнеплоды 1 из бункера поступают в цилиндрический неподвижный цилиндр 2 с установленными в нем 9-, 12- или 16-рамными устройствами 3 с двумя диффузионными ножами в каждом из них. Количество загруженной в барабан свеклы регулируется гидравлическим шибером. Свекла, загруженная в барабан, раскручивается трехлопастной улиткой 4, отбрасывается к стенке с закрепленными на ней диффузионными ножами и за счет инерционной силы измельчается в стружку определенной формы, создаваемой профилем зигообразной режущей кромки ножа. Стружка 5 сквозь окна между стенкой и ножом идет на сход в диффузионный аппарат.

Как показывает анализ процесса измельчения, ресурсопределяющим элементом в ЦС является свеклорезный нож. Только от его работоспособности зависят показатели эффективности измельчения [24].

Согласно схеме, представленной на рисунке 23, при измельчении сахарной свеклы на нож воздействуют моменты от резания свеклы

относительно оси вращения барабана (улитки)  $M_1$  и крутящий момент  $M_2$ , приходящийся на преодоление сил трения при инерционном движении о режущие кромки ножей. При исследованиях использовались параметры ЦС марки СЦБ-12А с двенадцатиножевыми рамками, укомплектованные ножами типа 1011В.

Момент от резания свеклы  $M_1$ , Н·м, определяется по формуле:

$$M_1 = FR, \quad (3)$$

где  $R$  – радиус цилиндра свеклорезки (см. рисунок 23), м;

$F$  – общее усилие резания, зависящее от конструктивных параметров ЦС и технологических особенностей сахарной свеклы, Н:

$$F = f \cdot 2lm\eta K_k, \quad (4)$$

где  $f$  – удельное усилие резания, для ромбовидной формы стружки находится в пределах 1230–1770 Н/м и зависит от состояния режущей кромки ножа. Этот показатель является характеристическим для установления наработки до появления отказа по причине ухудшения качества стружки в 100 г измельченной массы;

$l$  – длина режущей кромки ножа,  $l = 0,35$  м;

$m$  – число ножевых рам в свеклорезке,  $m = 12$  шт.;

$K_k$  – эксплуатационный коэффициент ЦС,  $K_k = 0,90$ ;

$\eta$  – коэффициент, учитывающий пустоты между соприкасающимися корнеплодами:

$$\eta = \frac{\rho}{\rho_T},$$

где  $\rho$  – насыпная плотность свеклы, зависит от массы свеклы, находящейся в интервале 0,3–0,5 кг, принимается равной 550–600 кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_T$  – технологический показатель, характеризующий плотность мякоти свеклы, принимается равным 1000 кг/м<sup>3</sup>.

Крутящий момент  $M_2$ , Н·м, на преодоление сил трения при инерционном движении:

$$M_2 = F_n \mu R, \quad (5)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения при скольжении свеклы о сталь, принимается равным 0,175...0,225;

$F_n$  – усилие прижатия свеклы при скольжении о нож, Н:

$$F_n = f_y \cdot 2\pi R \cdot 2lK_k,$$

где  $f_y$  – удельное давление свеклы при инерционном движении по режущим кромкам, Н/м<sup>2</sup>:

$$f_y = \frac{\rho \omega^2 R^2}{3},$$

где  $\omega^2$  – угловая скорость улитки, рад/с:

$$\omega = \frac{\pi N_u}{30},$$

где  $N_u$  – частота вращения улитки,  $N_u = 90 \text{ мин}^{-1}$ .

С целью определения цикличности ударных воздействий раскрученных улиткой корнеплодов на грани режущей части ножей установлена сменная производительность ЦС. Она определяется из выражения:

$$P_{\text{см}} = \frac{24 \cdot 60 \cdot 60 L a v \rho K_k K_\varepsilon}{1000}, \quad (6)$$

где  $24 \cdot 60 \cdot 60$  – продолжительность работы свеклорезки в сутки;

$L$  – общая длина режущих кромок 24 ножей:

$$L = l_1 m n,$$

где  $l_1$  – длина режущей кромки одного ножа,  $l_1 = 0,135$  м;

$a$  – высота подъема режущих кромок,  $a = 0,0005$  м;

$m$  – число рамок, шт.;

$n$  – число ножей в рамке, шт.;

$K_9$  – эксплуатационный коэффициент, учитывающий продолжительность работы свеклорезной установки без остановок,  $K_9 = 0,85$ ;

$v$  – скорость резания свеклы, м/с:

$$v = \frac{\pi D_6 N_u}{60},$$

где  $D_6$  – диаметр барабана, м.

Цикличность ударных воздействий свеклы  $N_{\Sigma H}$  зависит от сменной производительности ЦС и массы корнеплодов (0,3–0,5 кг):

$$N_{\Sigma H} = \frac{\Pi_{\text{см}}}{m}. \quad (7)$$

Конструктивно в барабане ЦС расположено 12 ножевых рамок с двумя ножами в каждой, следовательно, принимаем, что ударные нагрузки равномерно распределяются на грани 24 ножей и, исходя из этого, каждый нож воспринимает  $N_{\Sigma H}/24$  нагружений в смену.

Данные произведенных расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Показатели рабочего процесса измельчения сахарной свеклы в ЦС

Показатель	Обозначение	Единица измерения	Значение
Общее усилие резания	$F$	Н	1836,38...3096,79
Момент от резания свеклы	$M_1$	Н·м	1285,46...2167,75
Усилие прижатия свеклы при скольжении по грани ножа	$F_{\Pi}$	Н	8427,78...9193,95
Удельное давление свеклы при инерционном движении по режущим кромкам	$f_y$	Н/м	16594,38...18102,96
Угловая скорость улитки	$\omega$	рад/с	9,42
Крутящий момент на преодоление сил трения при инерционном движении	$M_2$	Н·м	1179,88...1287,15
Скорость резания	$v$	м/с	6,59
Сменная производительность ЦСУ	$\Pi_{\text{см}}$	т/сут.	388...423
Суммарная цикличность ударных воздействий свеклы	$N_{\Sigma H}$	ц/сут.	846000...1293300
Число ударных воздействий на один нож в смену	$N$	ц/сут.	35255...53887
Модуль упругости свеклы		мН/м <sup>2</sup>	5,3...7,8
Предел прочности мякоти свеклы		мН/м <sup>2</sup>	2,4...2,6
Максимальное относительное сжатие мякоти свеклы		%	50...60
Коэффициент трения свеклы по металлу		%	0,96

С учетом конструктивных особенностей ЦС подсчитано, что ежедневно каждый нож воспринимает от 37500 до 53542 ударных воздействий. Исходя из этих показателей, определены моменты, возникающие при резании корнеплода (см. таблицу 4). В соответствии со схемой, представленной на рисунке 24, процесс измельчения свеклы осуществляется за счет ее инерционного перемещения по режущим кромкам 24 ножей, закрепленных на

неподвижном цилиндре в плоскостях резания  $a-a$ , направленных под некоторым углом  $\alpha$  к режущей кромке ножа. Силы инерции, возникающие при ударном воздействии измельчаемого материала на режущую часть ножа, создают суммарные знакопеременные скорости резания, действующие на режущие кромки граней ножа [70, 71]. При этом при рубящем наклонном виде резания направление усилия резания устремлено к режущей кромке под углом  $\alpha$ , что разлагает скорость резания  $v_p$  на составляющие: нормальную скорость  $v_n$ , перпендикулярную режущей кромке, и касательную скорость  $v_t$ , характеризующую скользящее резание.

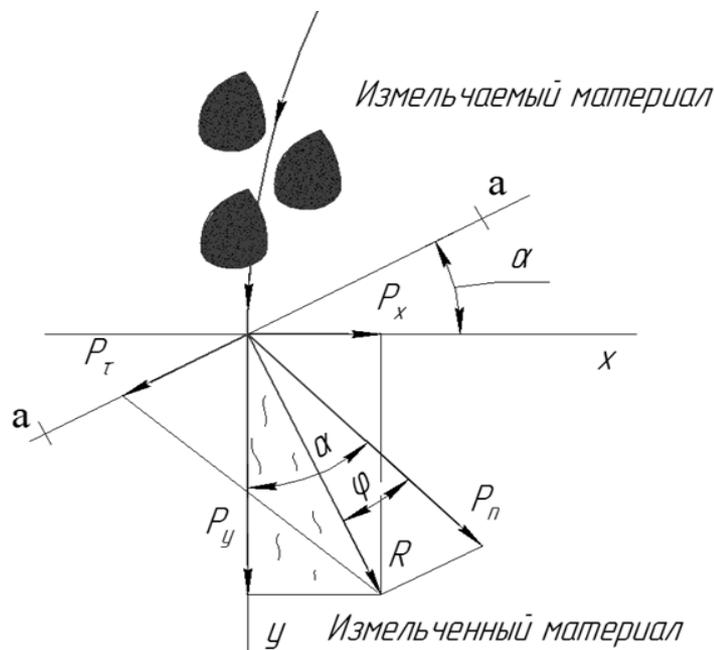


Рисунок 24 – Схема разложения сил, действующих на лезвие ножа  
в плоскости  $a-a$

Нож установлен под углом  $\alpha$  к поверхности резания. При этом возникают: вертикальная сила  $P_y$ , действующая по направлению резания; горизонтальная сила  $P_x$ , вызывающая противодействие процессу резания; скользящие касательные усилия  $P_t$ , вызываемые скольжением измельчаемого материала по лезвию ножа; нормальная составляющая сила  $R$ .

В зависимости от величины угла, который условно может быть установлен в пределах  $0...90^\circ$ , происходит процесс резания с различными

соотношениями сил действия  $P_y$  и противодействия  $P_x$ . Исходя из анализа действия сил, все случаи резания могут быть разбиты на три группы, а процесс измельчения ножами осуществляется следующим образом:

- резание нормальным давлением силой  $P_n$  без участия касательной силы  $P_\tau$  и без продольных перемещений свеклы по лезвию ножа;
- резание с участием касательной силы  $P_\tau$  и продольного перемещения свеклы по режущей кромке, но без скольжения;
- резание с учетом касательной силы  $P_\tau$  с наличием скольжения, при этом угол установки ножа  $\alpha$  больше угла  $\varphi$ , характеризующего нормальное усилие  $P_n$ .

Исходя из конструктивного решения ЦС и схемы контакта свеклы с режущей кромкой, при ее измельчении в стружку процесс резания следует отнести к третьей группе. Резание при этом усугубляется цикличностью нагружения от каждого очередного ударного воздействия корнеплода на режущие кромки грани ножа. Следствием такого воздействия являются в первом случае низкие показатели безотказности (устраняемыми частыми перезаточками режущей кромки, в итоге уменьшающими длины граней ножа ниже предельно допустимых размеров), во втором случае – потери работоспособности вследствие усталостного разрушения режущей кромки, что требует только замены ножа.

В обоих случаях резко снижаются показатели качества стружки, при которых препятствия проницаемости паренхимной клетки достаточно высоки. Это ведет к ухудшению выхода свекловичного сока и необходимости увеличения срока его диффузионной обработки. Невысокие показатели безотказности и долговечности ведут также к необходимости проведения частых ремонтно-обслуживающих воздействий. Все это ведет к повышению себестоимости производства сахара и потерям сахарозы при переработке.

## **2.2 Исследование процесса измельчения свеклы и обоснование зависимости качественных показателей стружки от состояния режущих кромок и граней ножа**

В соответствии со схемой работы ЦС, представленной на рисунке 23, на режущие кромки ножей при измельчении воздействует крутящий момент  $M_2$ , составляющий, согласно таблице 4, 1179,88...1287,15 Н·м.

Значительные нагрузки, приходящиеся на режущие кромки ножей, требуют теоретического анализа причин зависимости процесса измельчения сахарной свеклы от технического состояния свеклорезного ножа, позволяющего установить допустимые и предельные размерные состояния граней ножа и их наработку на отказ, являющиеся превалирующими показателями, обеспечивающими стабильное качество стружки. Данное обстоятельство позволяет предложить и исследовать конструктивно-технологические методы повышения износостойкости режущих кромок и предела выносливости граней на изгиб, регламентирующих безотказность и долговечность ножей.

Известно, что переработке продукции растениеводства предшествуют операции измельчения, необходимые для высвобождения из нее полезных составляющих. При этом измельчение каждого из объектов переработки специфично. Высокий вклад в теоретические исследования процессов измельчения внесли отечественные ученые В.П. Горячкин, Г.И. Бремер, В.А. Желиговский, Г.И. Новиков, А.Е. Резник, Е.С. Босой и др. Их труды явились основой для силового анализа рабочего процесса резания в ЦС.

Исследованиям процесса измельчения сахарной свеклы в ЦС посвящены работы [28, 72–74]. Однако в них применены несколько упрощенные решения, изменяющие картину колебательных и инерционных перемещений свеклы при измельчении, что не дает возможности установить рациональные технические решения для повышения показателей долговечности режущих кромок и граней ножей. В частности, согласно схеме (рисунок 25), принято развитие процесса измельчения с отсутствующими усилиями.



неподвижной стенке цилиндра и при ее соприкосновении с режущей кромкой ножа срезает с нее стружку и подает в сход. Процесс резания протекает по схеме, представленной на рисунке 26. Основными показателями, характеризующими качество измельчения, являются длина  $l$  и толщина  $a$  стружки. Только их оптимальное соотношение позволяет добиться максимального выхода сахарозы в диффузионном аппарате.

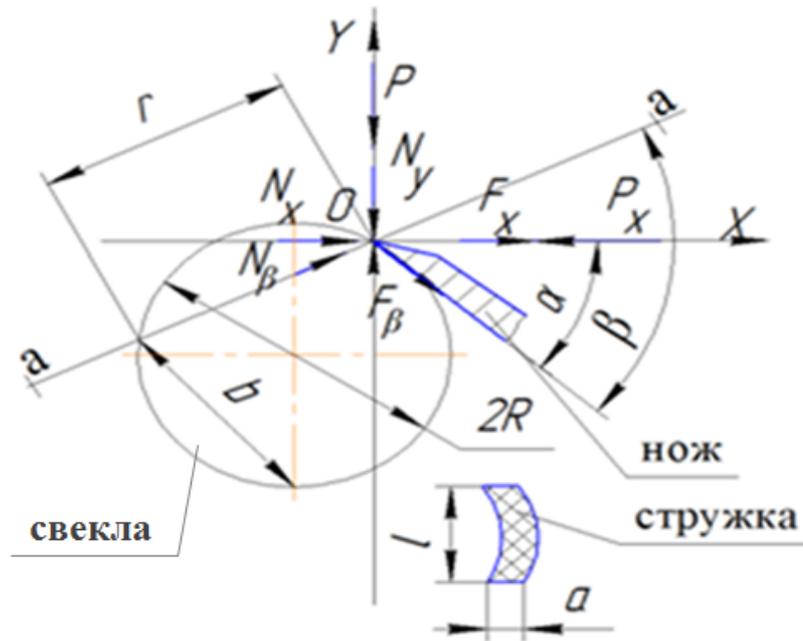


Рисунок 26 – Усилия, действующие на режущую кромку ножа при измельчении сахарной свеклы

При встрече измельчаемой свеклы с режущими кромками ножа возникает усилие  $P_x$ , затрачиваемое на преодоление силы реакции свеклы на внедрение в нее ножа  $N_x$ . Сила  $F_x$  характеризует трение между гранями ножа и поверхностью среза в плоскости резания  $a-a$ , расположенной под углом  $\alpha$  к оси  $x$ . При измельчении свеклы проекция нормальной силы на ось  $OX$ , характеризующая силу преодоления изгиба стружки, обозначена  $N_\beta$ , 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  $OY$  и проведя необходимые преобразования, получим формулу для расчета силы трения свеклы о режущие кромки и грани ножа:

$$F_x = \mu N_\beta (\cos \beta - 2 \sin \beta), \text{ Н}, \quad (8)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения свеклы о режущую грань ножа.

Усилие, необходимое для резания свеклы  $P_x$ , определяется из выражения:

$$P_x = N_x + N_\beta \sin \beta + F_x \cos \beta + F_x, \text{ Н}. \quad (9)$$

Выразив силы трения через нормальные усилия  $N_y$  и  $N_\beta$ , получим:

$$F_x = \mu N_y \text{ и } F_\beta = \mu N_\beta, \text{ Н}, \quad (10)$$

где

$$N_y = N_\beta \cos \beta - F_\beta \sin \beta, \text{ Н}.$$

Подстановкой значений  $F_x$  и  $F_\beta$  в уравнение (9) получено значение силы реакции на преодоление сил, препятствующих внедрению режущих кромок в материал свеклы:

$$P_x = N_x + N_\beta [\sin \beta (1 - \mu) + 2\mu \cos \beta], \text{ Н}. \quad (11)$$

В формуле (11) неизвестны усилия  $N_x$  и  $N_\beta$ , характеризующие силы реакции на внедрение свеклы в режущие кромки и преодоление силы изгиба стружки в момент измельчения свеклы.

На рисунке 26 измельчаемая свекла представлена в виде окружности диаметром  $2R$ , соприкасающейся в плоскости резания  $a-a$  с режущей кромкой под углом  $\alpha$ , характеризующим вылет режущей кромки ножа относительно окна схода стружки в ЦС. Отрезок  $r$  образуется в плоскости резания и, соответственно, представляет собой участок, на котором наблюдаются радиальные напряжения.

Распределение величины радиальных напряжений свеклы при резании ее ножом  $\sigma_r$ , описывается следующим образом:

$$\sigma_r = -\frac{2P \sin \alpha}{\pi r}, \text{ Па} \quad (12)$$

Максимальные касательные напряжения  $\tau_{\max}$  от воздействия инерционных сил определяются выражением:

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} [\sigma_r] = \frac{P \sin \alpha}{\pi r}, \text{ Па.} \quad (13)$$

В точке касания  $O$  касательные напряжения  $\tau_{\max}$  и радиальные  $\sigma_r$ , при условии, что  $r = 2R \sin \alpha$ , описываются выражениями:

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= \frac{P \sin \alpha}{2\pi R \sin \alpha} = \frac{P}{2\pi R}; \\ \sigma_r &= \frac{2P \sin \alpha}{2\pi r \sin \alpha} = \frac{P}{\pi R}. \end{aligned} \quad (14)$$

При условии, что сила реакции свеклы на внедрение в нее режущих кромок  $N_x = P$ , ее можно выразить следующим образом:

$$N_x = \pi R \sigma_r b, \text{ Н}, \quad (15)$$

где  $b$  – ширина действия сосредоточенной силы  $N_x$ , равная общей развернутой длине режущих кромок ножа, м.

Разрушение волокон свеклы при ее измельчении будет зависеть от величины допускаемого напряжения на сжатие:

$$N_x = \pi R [\sigma_{\text{сж}}] b, \text{ Н.} \quad (16)$$

Как было установлено ранее (см. рисунок 26), изрезывание свеклы зависит от усилий  $F_\beta$  и  $N_\beta$ . Изгиб стружки, возникающий при измельчении, препятствует продвижению режущих кромок в ее волокна. Это обусловлено физико-механическими характеристиками свеклы, остротой режущих кромок и геометрической формой граней ножа. От их технического состояния

зависит глубина внедрения в свеклу и, соответственно, длина контакта стружки с гранью, в итоге создающего определенную длину стружки в 100 г навески.

Изгиб стружки рассматривался как изгиб консольной балки [84–87] под действием нормальной распределенной нагрузки  $P$ , изменяющейся по линейному закону по длине контакта стружки  $l$  с гранью ножа.

Усилие  $F_\beta$ , характеризующее трение стружки о грань ножа, действует как сжимающее.

Наклон режущей кромки ножа под углом  $\beta$  создает сосредоточенный момент от пары сил, равных  $N_x$  (см. рисунок 26). Максимальное значение касательных сил наблюдается в точке среза свеклы, и оно равно произведению коэффициента трения свеклы о грань ножа  $\mu[\sigma_{сж}]$ :

$$F_\beta = \frac{1}{2} \mu[\sigma_{сж}] l l_1, \text{ Н.} \quad (17)$$

где  $l_1$  – суммарная длина режущих кромок ножа, м.

Напряжение  $\sigma_\rho$  от действия силы  $F_\beta$  можно записать в виде:

$$\sigma_\rho = \frac{1}{2} \frac{\mu[\sigma_{сж}] l l_1}{S}, \text{ Па,} \quad (18)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения стружки,  $\text{м}^2$ .

Вследствие того, что максимальный изгибающий момент  $M(0)$  наблюдается в точке среза, то в соответствии с рекомендациями [84] оно определяется следующим образом:

$$M(0) = M + \frac{1}{2} [\sigma_{сж}] l \cdot \frac{1}{3} l_1 b, \text{ Нм,} \quad (19)$$

где  $M$  – сосредоточенный момент, приложенный в точке  $x_0 = l$ ;

$b$  – ширина стружки, м.

Сосредоточенный момент  $M$ :

$$M = N_x y_1, \text{ Нм}, \quad (20)$$

где  $y_1$  – перемещение отсекаемой стружки в точке  $x_0 = l$ ,  $y_1 = l \sin \beta$ .

Подстановкой значений  $N_x$  и  $y_1$  из выражений (17) и (21) окончательно получим:

$$M = \pi R [\sigma_{\text{сж}}] l l_1 \sin \beta, \text{ Нм}. \quad (21)$$

Тогда

$$M(0) = \pi R l l_1 [\sigma_{\text{сж}}] \sin \beta + \frac{[\sigma_{\text{сж}}] l^2 b}{6}, \text{ Нм}. \quad (22)$$

Принимая, что напряжение изгиба стружки при резке равно:

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{M(0) y_0}{J},$$

напряжение изгиба стружки можно записать следующим образом:

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{(6\pi R l l_1 [\sigma_{\text{сж}}] \sin \beta + [\sigma_{\text{сж}}] l^2 b) y_0}{6J}, \text{ Па}, \quad (23)$$

где  $J$  – момент инерции, Нм;

$y_0$  – самая удаленная от нейтральной оси точка сечения стружки, м.

Нормальные напряжения в сечении стружки  $x = 0$  равны:

$$\sigma(0) = \sigma_{\text{изг}}(0) \sigma_p. \quad (24)$$

И тогда для зоны упругой деформации свеклы нормальные напряжения будут иметь вид:

$$\sigma(0) = \frac{(6\pi R l l_1 [\sigma_{\text{сж}}] \sin \beta + [\sigma_{\text{сж}}] l^2 b) y_0}{6J} - \frac{1}{2} \frac{\mu [\sigma_{\text{сж}}] l l_1}{S}, \text{ Па}. \quad (25)$$

При достижении значений напряжений величин, когда начинается процесс разрушения волокон свеклы,  $\sigma_p(0)$  должно быть равным предельно допустимому напряжению  $\sigma_{pp}$ :

$$\sigma_{pp} = \frac{(6\pi R l l_1 [\sigma_{сж}] \sin\beta + l^2 b [\sigma_{сж}]) y_0}{6J} - \frac{\mu [\sigma_{сж}] l l_1}{2S}, \text{ Па.} \quad (26)$$

После преобразований получим:

$$l^2 b y_0 S + (6\pi R l_1 \sin\beta S - 3J \mu l_1) l - \frac{6JS [\sigma_{pp}]}{[\sigma_{сж}]} = 0. \quad (27)$$

В общем виде уравнение для определения длины стружки  $l$ , на которой протекает процесс ее резания, можно записать:

$$A l^2 + B l + C = 0, \quad (28)$$

где

$$b y_0 S = A; \quad 6\pi R l_1 \sin\beta S - 3J \mu l_1 = B; \quad -\frac{6JS [\sigma_{pp}]}{[\sigma_{сж}]} = C.$$

Неизвестная величина  $l$  для случая, когда протекает процесс резания, а не упругой деформации свеклы, при  $l^2 < 0$ :

$$l = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}. \quad (29)$$

Длина поверхности контакта свеклы  $l$  с гранями ножа при измельчении является определяющим параметром для получения качественной стружки, что характеризуется ее длиной в 100 г навески. По мере изнашивания граней ножей при эксплуатации их длина уменьшается, одновременно с этим увеличивается и конструктивно установленный зазор между стенкой

неподвижного цилиндра и режущей кромкой. Это ведет к утолщению стружки и, соответственно, с уменьшением длины контакта – к ее укорочению. Сила преодоления изгиба стружки  $N_\beta$  возрастает, так как она непосредственно зависит от длины  $l$  и ширины  $b$  стружки:

$$N_\beta = \frac{1}{2} [\sigma_{сж}] lb, \text{Н.} \quad (30)$$

На этом основании из проведенного силового анализа процесса измельчения установлена зависимость процесса резания и размерных параметров стружки от технического состояния ножа. Размерные параметры граней ножа необходимо поддерживать в установленных интервалах, после превышения которых наступает предельное состояние и, соответственно, отказ по качественному признаку стружки, что ведет к выбраковке ножа. Таким образом, для повышения долговечности ножей необходимо повысить износостойкость режущих кромок и сократить тем самым количество перезаточек, ведущих к укорачиванию длины граней и утолщению стружки.

#### 2.4 Обоснование конструктивных параметров ножа

Для определения показателей моментов инерции  $J$ ,  $J_0$  и площади поперечного сечения стружки  $S$  использовали схему, представляющую собой сечение ножа с установленными конструктивными размерами ромбовидной грани (рисунок 27).

Исходя из схемы, момент инерции  $J_x$  относительно оси  $OX$ :

$$J_x = \frac{a_1 H_1^3}{12} - \frac{a_2 H_2^3}{12}. \quad (31)$$

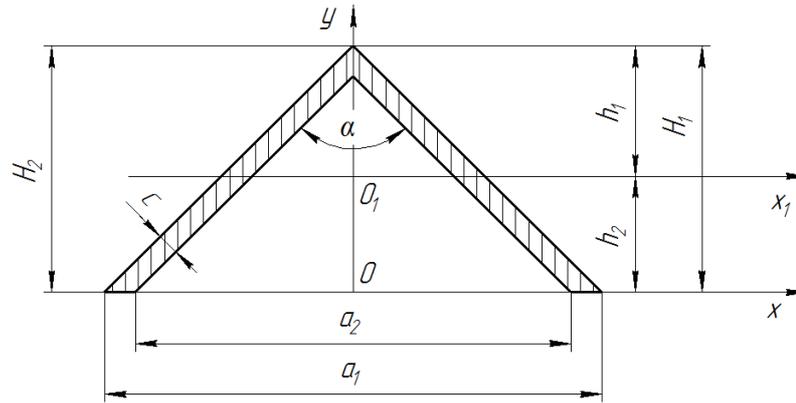


Рисунок 27 – Сечение грани ножа с ромбовидным профилем

Момент инерции относительно нейтральной оси  $OX_1$ , учитывающий конструктивные особенности ромбовидной грани, равен:

$$J_{x_1} = \frac{a_1 H_1^3}{12} - \frac{a_2 H_2^3}{12} - h_2^2 S, \quad (32)$$

где  $a_1$  – шаг грани с учетом толщины стенок  $c$ , мм;

$a_2$  – длина внутренней полости грани, мм:

$$a_2 = a_1 - 2c \sin \frac{\alpha}{2};$$

$H_1$  – высота грани, мм;

$H_2$  – высота полости грани, мм:

$$H_2 = H_1 - c \cos \frac{\alpha}{2};$$

$h_2$  – в соответствии с геометрическими параметрами грани расстояние между осями  $OX$  и  $O_1X_1$ .

Исходя из расчетной схемы, самая удаленная точка от нейтральной оси  $y_0$ :

$$y_0 = h_2 = \frac{1}{3} H_1. \quad (33)$$

С учетом размерных характеристик граней площадь сечения стружки  $S$  рассчитывается выражением:

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{1}{2}H_1\alpha_1 - \frac{1}{2}H_2\alpha_1 = \frac{1}{2}\left[H_1\alpha_1 - \left(H_1 - c\cos\frac{\alpha}{2}\right)\left(\alpha_1 - c\cos\frac{\alpha}{2}\right)\right] = \\
 &= \frac{1}{2}\left(H_1\alpha_1 - H_1\alpha_1 + \alpha_1 c\cos\frac{\alpha}{2}\right) + 2H_1c\sin\frac{\alpha}{2} - 2c^2\sin\frac{\alpha}{2}\cos\frac{\alpha}{2} = \\
 &= \frac{c}{2}\left(\alpha_1\cos\frac{\alpha}{2} + 2H_1\sin\frac{\alpha}{2} - 2c^2\sin\frac{\alpha}{2}\cos\frac{\alpha}{2}\right). \quad (34)
 \end{aligned}$$

Подстановкой известных конструктивных параметров грани  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $S$ ,  $b$  в выражение (34) получим момент инерции относительно профиля режущей кромки грани ножа:

$$\begin{aligned}
 J &= \frac{a_1H_1^3}{12} - \frac{\left(\alpha_1 - 2c\sin\frac{\alpha}{2}\right)\left(H_1 - c\cos\frac{\alpha}{2}\right)}{12} - \\
 &- \frac{H_1^2c}{9}\frac{c}{2}\left(\alpha_1\sin\frac{\alpha}{2} + 2H_1\sin\frac{\alpha}{2} - 2c\sin\frac{\alpha}{2}\cos\frac{\alpha}{2}\right). \quad (35)
 \end{aligned}$$

В свою очередь, исходя из приведенных данных, искомое выражение для расчета напряжения, приходящегося на контактирующую со свеклой граненую плоскость ножа и ведущего при работе к изменению профиля граней и короблению режущей плоскости, примет вид:

$$\sigma_{\text{нар}} = -\frac{P_y l_1}{3J} - \frac{P_{x_1}}{S}. \quad (36)$$

Учитывая схему, представленную на рисунке 27, расчетные формулы (17), (29), (30) и (31) для конкретного ромбовидного профиля грани примут вид:

– сила реакции свеклы на внедрение в режущие кромки:

$$N_x = \pi R[\sigma_{\text{сж}}] \frac{2H_1}{\cos\frac{\alpha}{2}}; \quad (37)$$

– сила преодоления режущей гранью изгиба стружки:

$$N_{\beta} = \frac{1}{2} [\sigma_{\text{сж}}] l a_2 = \frac{1}{2} [\sigma_{\text{сж}}] l \left( a_1 - 2c \sin \frac{\alpha}{2} \right); \quad (38)$$

– длина контакта стружки с гранью ножа:

$$A = \left[ a_1 - 2c \sin \frac{\alpha}{2} \frac{1}{3} H_1 \frac{c}{2} \left( a_1 \cos \frac{\alpha}{2} + 2H_1 \sin \frac{\alpha}{2} - 2c \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right) \right];$$

$$B = 6\pi R \frac{2H_1}{\cos \frac{\alpha}{2}} \frac{c}{2} \left( a_1 \cos \frac{\alpha}{2} + 2H_1 \sin \frac{\alpha}{2} - 2c \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right) \times$$

$$\times \sin \beta - 3\mu \frac{2H_1}{\cos \frac{\alpha}{2}} \left[ \frac{a_1 H_1^3}{12} - \frac{\left( a_1 - 2c \sin \frac{\alpha}{2} \right) \left( H_1 - c \cos \frac{\alpha}{2} \right)}{2} - \frac{H_1^2 c}{9} \frac{c}{2} \times \right.$$

$$\left. \times \left( a_1 \cos \frac{\alpha}{2} + 2H_1 \sin \frac{\alpha}{2} - 2c \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right) \right];$$

$$C = - \frac{6[\sigma_p]}{[\sigma_{\text{сж}}]} \left[ \frac{a_1 H_1^3}{12} - \frac{\left( a_1 - 2c \sin \frac{\alpha}{2} \right) \left( H_1 - c \cos \frac{\alpha}{2} \right)}{2} - \frac{H_1^2 c}{9} \frac{c}{2} \times \right.$$

$$\left. \times \left( a_1 \cos \frac{\alpha}{2} + 2H_1 \sin \frac{\alpha}{2} - 2c \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right) \frac{c}{2} \times \right.$$

$$\left. \times \left( a_1 \cos \frac{\alpha}{2} + 2H_1 \sin \frac{\alpha}{2} - 2c \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right) \right]$$

Анализом рабочего процесса измельчения сахарной свеклы в ЦС установлены силовые характеристики, обуславливающие инерционное перемещение корнеплода относительно режущих кромок граней ножа и колебательные механические движения от его центробежного движения и ударного воздействия на грани.

Полученные значения интерпретированы по отношению к изучаемому ромбовидному профилю граней ножа, что позволило путем варьирования

показателей напряженного состояния исследовать и обосновать направления увеличения долговечности ножа, являющейся основным путем повышения эффективности измельчения свеклы.

Силовым анализом рабочего процесса установлено, что на показатели износостойкости режущих кромок граней в значительной мере влияют инерционные моменты от перемещения свеклы по режущим кромкам, силы реакции свеклы на внедрение в нее режущих кромок и сила преодоления изгиба стружки относительно режущей грани.

## **2.5 Обоснование конструктивно-технологических схем повышения износостойкости и предела выносливости на изгиб граней ножа**

Как было установлено в разделе 1, отказы ножа характеризуются не потерей работоспособности, а резким изменением качественных показателей свекловичной стружки. При этом затупление режущих кромок ведет к постепенному увеличению потерь сахарозы от 2–5 % в начале смены до 28–30 % к концу. Отказы режущих кромок устраняют путем ежесменных перезаточек, количество которых, вследствие изменения картины измельчения, проявляющегося в утолщении стружки, ограничено 4–5, после этого ножи выбраковывают.

Данное обстоятельство говорит о целесообразности повышения износостойкости режущих кромок граней ножей. Необходимо создание условий изнашивания, при которых длина стружки (см. рисунок 5) в течение смены и к ее концу будет составлять 14–11 м на 100 г навески.

Значительное количество (около 35 %) ножей выбраковывают по причине поломок режущих кромок или отдельных участках, или по всей длине граней (см. рисунки 10, 11). Поломки происходят по двум причинам. Первой из них являются нагрузки, вызываемые ударными воздействиями корнеплода на вершины граней ножа от центробежных сил с моментом около 2000 Н·м. Их цикличность при суточной производительности ЦС 425 т составляет около

50000 ударов, что, соответственно, вызывает усталостные разрушения. Второй причиной разрушений режущих кромок по длине грани является попадание инородных твердых материалов (смерзшиеся комки земли, льдинки и замороженные корнеплоды).

Данное обстоятельство также обуславливает необходимость повышения предела выносливости на изгиб граней и, следовательно, усталостной прочности.

В соответствии с рассмотренными причинами возникновения дефектов и низких показателей наработки на отказ, для повышения долговечности ножей следует использовать конструктивно-технологические методы упрочнения ножей. Они подразумевают использование новых методов расчета и выбора конструкции, рациональных материалов и технологий восстановления и упрочнения ножей [96].

Наиболее эффективными конструктивными решениями для повышения долговечности являются снижение уровня воздействия динамических нагрузок на режущие кромки и грани ножа путем упрочнения их дна и вершин, а также изменение марки материала. Вместо используемой в настоящее время инструментальной углеродистой стали У7, обладающей хорошей ударной стойкостью, но склонной к затуплению, трещинообразованию и выкрашиванию режущей кромки, следует применять хорошо себя зарекомендовавшую при использовании в режущем инструменте коррозионностойкую, износостойкую, стойкую к трещинообразованию и выкрашиванию сталь мартенситного класса 40X13.

Технологически повышение долговечности осуществимо путем улучшения свойств материала при формировании режущих поверхностей. Замена технологии механической обработки на обработку давлением ведет к улучшению свойств материала. Термомеханическая обработка позволяет значительно повысить износостойкость и прочность режущих кромок и граней ножа. За счет нормализации, ведущей к образованию мелкозернистой однородной структуры, должны повышаться прочность, ударная вязкость и

износостойкость граней ножа.

Как установлено многими исследованиями и материалами, представленными в подразделе 1.7, методы объемного и поверхностного пластического деформирования повышают усталостную прочность металла. Эффект упрочнения достигается за счет создания в поверхностных слоях детали значительных остаточных сжимающих напряжений, противодействующих напряжениям растяжения от внешней нагрузки.

При формировании граней ножа фрезерованием структура по сечению ромбовидной грани однородна по строению. Механическая обработка не оказывает на данную структуру упрочняющего эффекта, в отличие от, образованной после обработки давлением (прокатки,ковки или штамповки). При приложении в определенном направлении усилий, превышающих показатели упругой деформации материала, возникают условия, ведущие к образованию тангенциальных линий скольжения и, соответственно, к сдвигам и двойникованиям структуры металла [97]. Сдвиги перемещают одну часть кристаллической решетки относительно другой, а двойникования сопровождаются одновременным поворотом некоторого объема кристаллической решетки на определенный угол, в зависимости от направления деформации.

Структура материала в плоскостях сдвига и двойникования улучшается, так как все искажения кристаллической решетки ведут к измельчению и дроблению зерен и, соответственно, к упрочнению материала. При обработке давлением дендритное строение макроструктуры, деформируясь, превращается в волокнистое, что хорошо иллюстрируется элементом кованого коленчатого вала (рисунок 28).

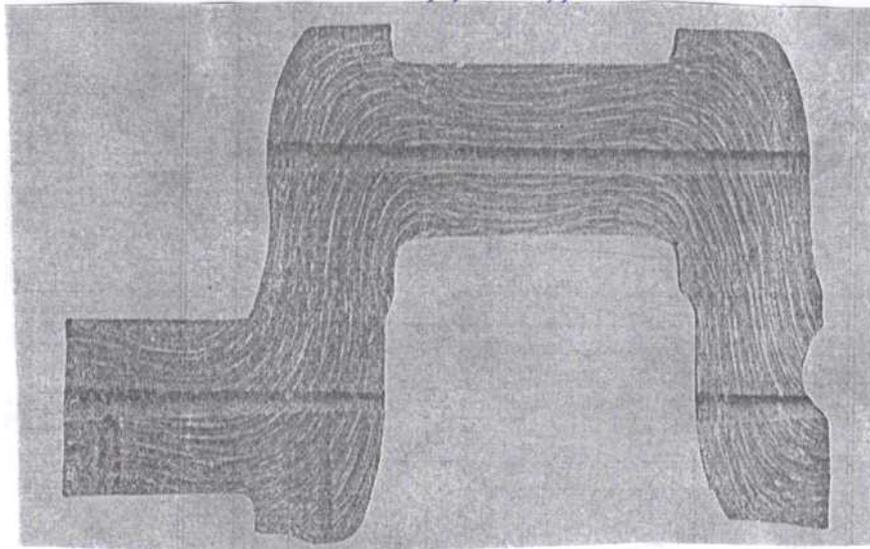


Рисунок 28 – Волокнистая направленность структуры при деформации

Направление и строение волокон зависят от направления деформации и в случае наличия переменного профиля беспрерывно повторяют его контуры по всей глубине слоя металла. Как установлено исследователями в области материаловедения, механические свойства материала детали вдоль сечения обладают более высокими прочностными и вязкостными характеристиками, чем поперек сечения детали.

## **2.6 Исследование напряженно-деформированного состояния и схем формообразования при восстановлении и упрочнении граней ножа**

Обработка давлением в специальной штамповой оснастке позволит целенаправленно повысить износостойкость и ударную прочность граней режущих кромок ножей [98–114].

Восстановительные операции по устранению деформированных граней ножа с измененными размерами и геометрической формой ромбовидного профиля, ведущие к усложнению операции заточки режущих кромок, проводятся в штамповой оснастке со сменными деформирующими элементами (рисунок 29).

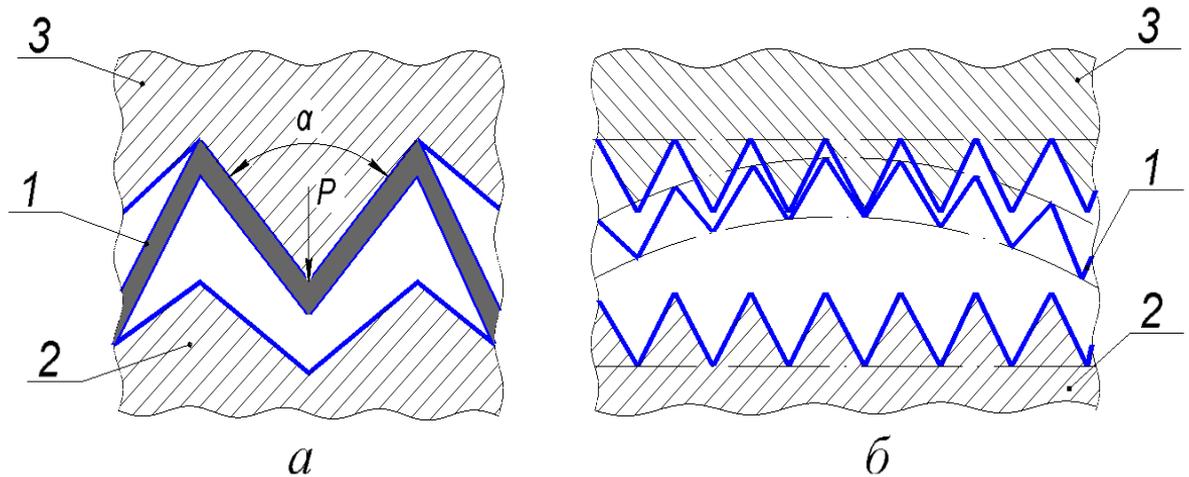


Рисунок 29 – Схема формообразования граней ножа при восстановлении деформированных граней (*а*) и коробления плоскости (*б*)

Грани деформирующих элементов матрицы и пуансона штампа конструктивно зеркальны форме и размерам восстанавливаемого ножа. В соответствии с принятой схемой формообразования восстанавливаемый нож *1* устанавливается в грани матрицы *2* штампа. Пуансон *3* под действием усилия *P* одновременно воздействует на все грани ножа, устраняя при этом деформацию формы граней (рисунок 29, *а*) и коробление плоскости (рисунок, 29, *б*). Процесс восстановления завершается при полном смыкании элементов штампа.

При разработке схемы формообразования граней принимались условия, в соответствии с которыми обработке давлением подвергались ножи с деформированными гранями и заготовки толщиной 6 мм. Основанием этому являлась толщина привалочной установочной плоскости (рисунок 30). На рисунке 30 представлены схемы образования грани ножа.

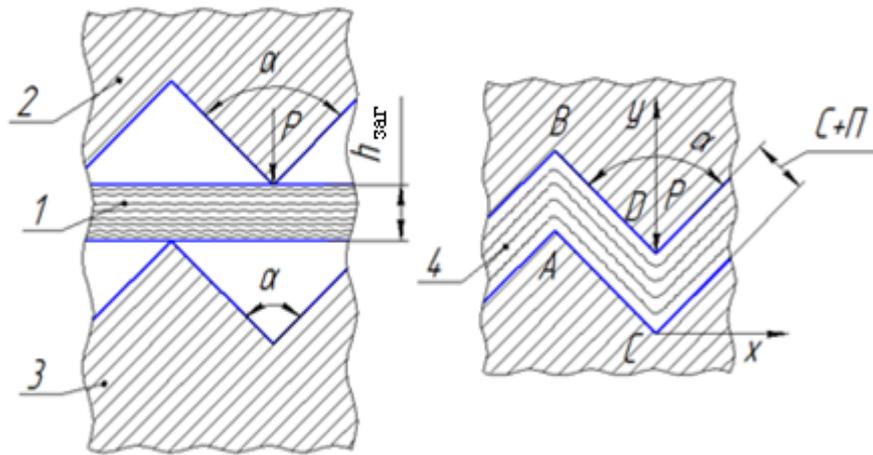


Рисунок 30 – Схема формообразования граней при их восстановлении и упрочнении:

*1* – заготовка; *2* – пуансон; *3* – матрица; *4* – сформированные грани ножа;

*P* – приложение усилия деформации;  $h_{\text{заг}}$  – толщина заготовки;

$C + П$  – толщина заготовки с припусками

Нормальные усилия деформации анализировали по одному элементу граней методом линий скольжения [98, 107–110]. Ввиду того, что при деформации заготовки *1* на деформирующей поверхности пуансона *2* и формообразующей поверхности матрицы *3* возникают максимальные касательные напряжения  $\tau = k$ , первое семейство линий скольжения в точках их соприкосновения будет направлено по касательной и пересекать матрицу под углом  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ . На этом основании линии скольжения *AB* на формируемых гранях ножа должны принадлежать первому семейству и формировать боковые поверхности и пики граней ножа, а линии скольжения *AC* и *BD* – второму семейству и формировать также боковые стенки граней *4* и их впадины.

Нормальные напряжения  $\sigma_n$ , МПа, при деформации заготовки определяются по выражению:

$$\sigma_n = 2k(1 + \varphi), \quad (39)$$

где  $\varphi$  – угол поворота линий скольжения от точки *A* до точки *B*, град.

Ранее принималось, что деформирующие и формообразующие плоскости

пуансона и матрицы взаимно параллельны, т. е.  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ . Тогда:

$$\sigma_H = 2k\left(1 + \frac{\pi}{2}\right). \quad (40)$$

При условии, что при тангенциальном сдвиге  $k = \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_s$ , выражение (40) примет вид:

$$\sigma_H = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s \left(1 + \frac{\pi}{2}\right) = -\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot 2,57\sigma_s = -1,155 \cdot 2,57\sigma_s = -2,87\sigma_s, \quad (41)$$

где  $\sigma_s$  – напряжение текучести материала, МПа.

Учитывая, что напряжение, действующее в поперечном сечении пуансона по координате  $y$ , имеет вид:

$$\sigma_y = \sigma_H \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (42)$$

усилие  $P_1$ , Н, действующее при формировании одной грани, рассчитывается по формуле:

$$P_1 = \sigma_H \sin \frac{\alpha}{2} S, \quad (43)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения одного сектора пуансона,  $\text{м}^2$ .

Исходя из данных, полученных в выражении (41), равенство (43) запишется следующим образом:

$$P_1 = 2,87\sigma_s \sin \frac{\alpha}{2} S. \quad (44)$$

Конструктивно нож состоит из  $n$  режущих граней, следовательно, и пуансон с матрицей состоят из  $n$  деформирующих и формообразующих граней. Тогда общее усилие деформации можно записать в виде:

$$P_1 = 2,87\sigma_s \sin \frac{\alpha}{2} Sn. \quad (45)$$



колонн 7, обеспечивающих точное вхождение противоположно расположенных граней в материал заготовки и друг в друга. Установочная привалочная плоскость ножа 8 не деформируется, ее толщина определяется толщиной заготовки, а переходная часть 9 ножа формируется при деформации его режущей части.

С целью повышения стойкости деформирующих и формообразующих элементов штампа окончание процесса деформации сопровождается срабатыванием пружинного механизма 10, предохраняющего процесс деформации от избыточного давления.

Анализом ремонтного фонда установлен один из часто фиксируемых дефектов, заключающийся в деформации граней ножа. Устранение данного дефекта способом, предложенным СКБ НИИ сверхтвердых материалов (см. рисунок 15), технически нецелесообразно. Холодная правка закаленных до твердости 60–63 HRC гранях со сквозным прокаливанием тонких (от 0,8 до 1,0 мм) стенок граней ведет к трещинообразованию и понижению прочности ножа.

Применение предлагаемой штамповой оснастки для горячей правки деформированных ножей путем замены деформированных и формообразующих элементов, изготовленных без припусков на механическую обработку, позволяет обеспечить необходимые показатели прочности и долговечности восстановленных ножей.

Все экспериментальные исследования формообразования ножей велись на макетной и опытно-конструкторской штамповой оснастке (рисунок 32), состоящей из граненых формообразующей матрицы 1 и деформирующего пуансона 2, установленных на стол прессы плитой 3 и на траверсе 4.

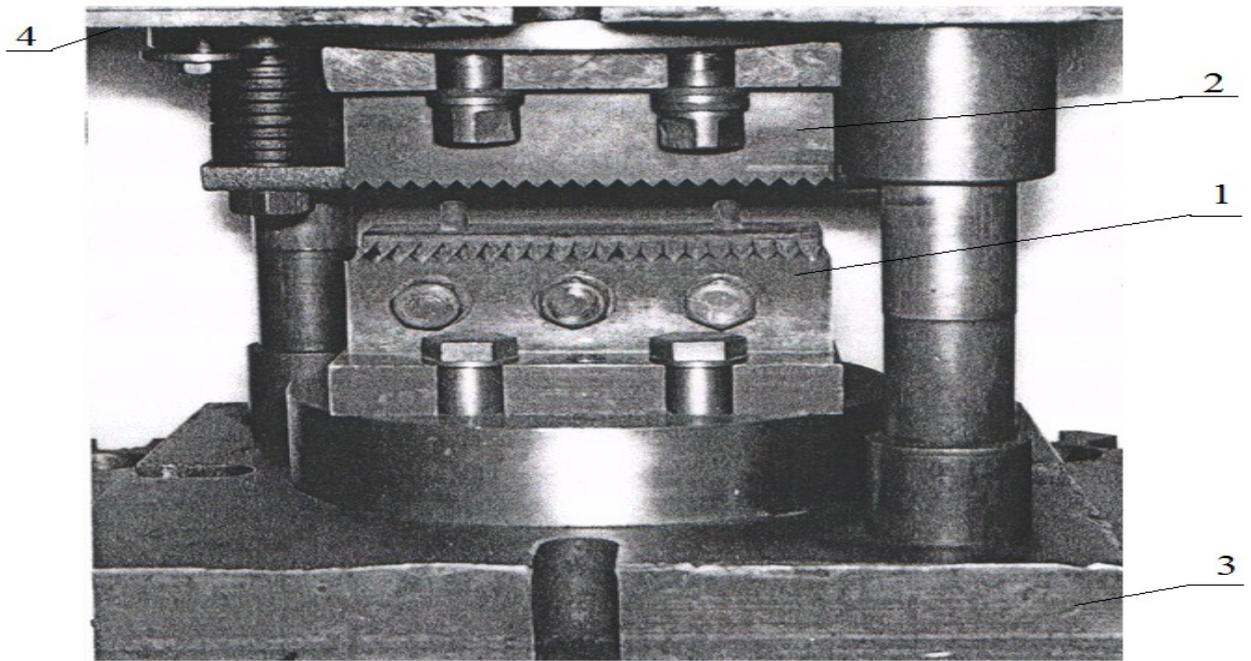


Рисунок 32 – Действующая опытно-конструкторская оснастка для штамповки при восстановлении и упрочнении ножей: 1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – станина; 4 – траверса

Сменные деформирующие и формообразующие граненые элементы матрицы и пуансона, используемые при восстановлении деформированных при эксплуатации граней, представлены на рисунке 33.

Оснастка для механической обработки зубьев, представленная на рисунке 34, выполнена в виде многофрезерной оправки, одновременно обрабатывающей все грани одной стороны ножа, что позволяет осуществить всю механическую обработку за 2 перехода. Жесткость оправки и точность обработки граней обеспечиваются уже сформированным штамповкой профилем граней и незначительным, составляющим 1 мм, припуском на механическую обработку.

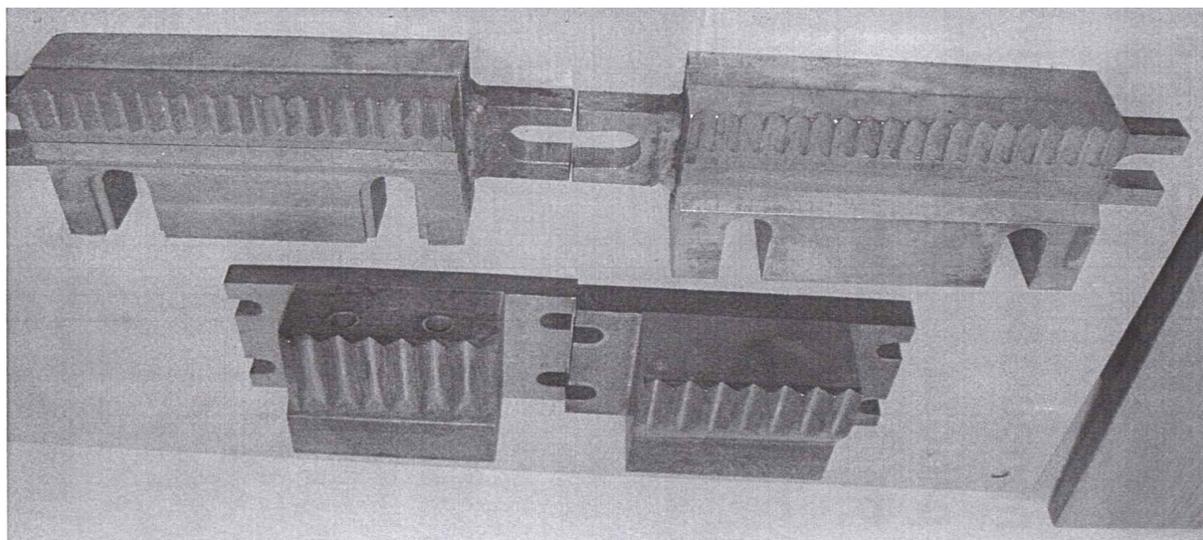


Рисунок 33 – Сменные деформирующие и формообразующие элементы для устранения коробления граней

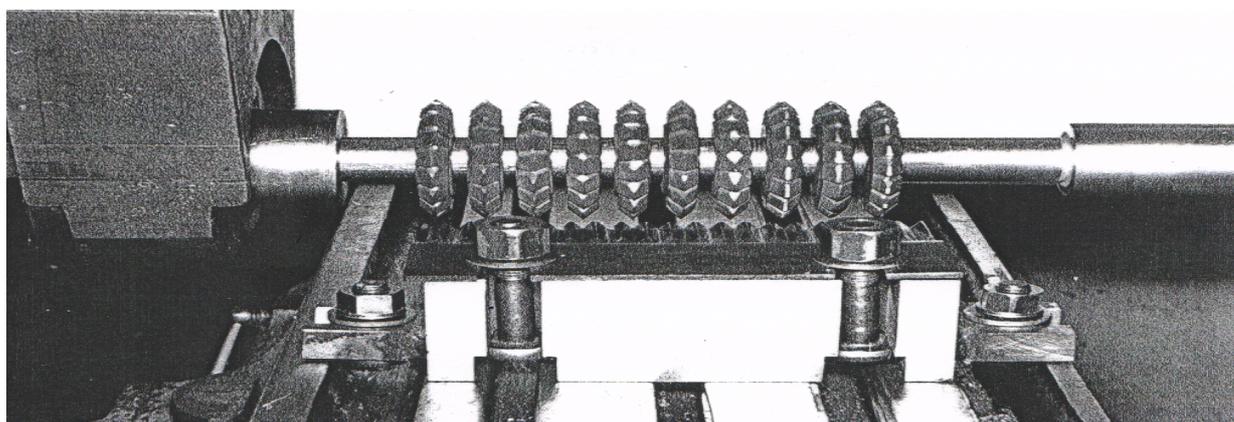


Рисунок 34 – Оснастка для механической обработки поковки

Размеры заготовки ножа играют существенную роль при формировании рабочих поверхностей штамповкой. Параметры заготовки определяются расчетами по схеме, учитывающей размеры конечного изделия и размеры поковки с припусками на механическую обработку (рисунок 35).

В соответствии с конструктивной толщиной грани ножа  $l_1 = 1$  мм и толщиной слоев металла, необходимых для механической обработки граней ( $l_2 = l_3 = l_1 = 1$  мм), расчетами для случая изготовления ножей по технологии пластического деформирования установлены размерные параметры заготовки, представленные в таблице 5.

Таблица 5 – Размеры заготовки ножа

Параметр	Значение
Толщина заготовки, мм	6
Количество режущих граней $n_{эл}$	40
Ширина режущей части, мм	48
Площадь проекции элемента режущей грани $F_1$ , мм <sup>2</sup>	6,78
Площадь проекций припусков режущих граней $F_2, F_3$ , мм <sup>2</sup>	6,78
Площадь элементов режущих граней $F_{эл}$ , мм <sup>2</sup>	20,34
Площадь заготовки режущих граней $F_{рг}$ , мм <sup>2</sup>	813,6
Площадь заготовки, $F_{заг}$ , мм <sup>2</sup>	39052,8
Ширина заготовки $H_{заг}$ , мм	39,2

Ресурсосберегающие показатели обеспечиваются анализируемыми технологиями изготовления ножей. Металлоемкость заготовок ножей в первую очередь зависит от пластины заготовки и ее объема. Были приняты три варианта изготовления:

- пластина постоянного сечения с фрезерованием привалочной и режущей плоскостей с гранями – металлоемкость составляет 1,83 кг;
- пластина с профилированными привалочной и режущей плоскостями с фрезерованием граней – 1,06 кг;
- пластина под штамповку привалочной и режущей частей со сформированными гранями – 0,64 кг.

Во вторую очередь металлоемкость определяется съемом металла, приходящимся на формирование привалочной и режущей плоскостей с гранями. На этом также экономится около 30 % металла.

Таким образом, ресурсосбережение от перевода технологии механической обработки на штамповку может составлять: по первому варианту – 1,19 кг металла; по второму варианту – 0,42 кг.

На рисунке 35 представлены поэтапные операции технологического процесса изготовления ножей.

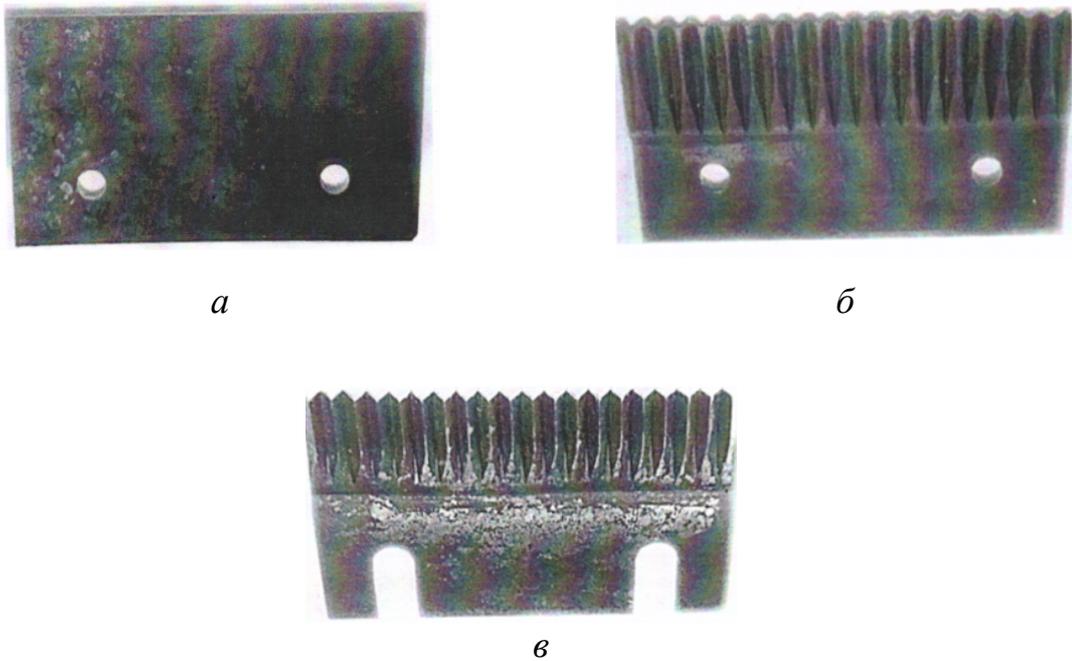


Рисунок 35 – Технологический процесс изготовления ножа: *а* – пластина заготовки;  
*б* – поковка со сформированными плоскостями и режущими гранями;  
*в* – нож с обработанными режущими гранями

Экспериментальными исследованиями штамповой оснастки установлены показатели производственных характеристик:

- производительность штамповой оснастки, мин – 8;
- длительность обработки зубьев, мин:
- механической обработкой заготовки – 30;
- штампованных заготовок – 10;
- экономия металла, % – 150–270;
- экономия электроэнергии, % – 50.

## **2.8 Обоснование профиля и параметров граней ножа с повышенным пределом выносливости на изгиб**

Опираясь на данные, представленные в подразделах 1.4 «Условия работы, конструктивные особенности и причины потери работоспособности центробежных установок» и 1.5 «Дефектное состояние свеклорезных ножей

и способы восстановления их работоспособности», а также на данные теоретического анализа, представленные в подразделах 2.1 «Исследование рабочего процесса измельчения сахарной свеклы в ЦС» и 2.2 «Теоретическое исследование процесса измельчения свеклы и обоснование зависимости качественных показателей стружки от состояния граней ножа» и учитывая тенденции предложенных конструктивных изменений, автор предложил улучшенную конструкцию ножа.

### **2.8.1 Конструктивное повышение выносливости на изгиб граней ножа**

Анализом дефектного состояния ножей при эксплуатации установлены два основных дефекта. Это износ режущей кромки и усталостное разрушение граней.

Первый дефект может быть устранен путем перезаточек, число которых ограничено уменьшением длины режущих граней на 4–6 мм. При большем уменьшении длины режущих граней увеличивается зазор в ножевой рамке и меняются в худшую сторону практически все качественные показатели свекловичной стружки. На этом основании принято условие о необходимости повышения износостойкости и долговечности ножей путем замены материала и применения упрочняющей технологии при изготовлении и восстановлении.

Второй дефект, связанный с усталостным разрушением граней, восстановлению не подлежит. Это также обуславливает целесообразность замены материала другим, с повышенными показателями выносливости на изгиб, применения упрочняющей технологии и, самое основное, изменения конструкции ножа с обеспечением повышенных показателей выносливости граней на изгиб.

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

воздействия на грани ударных циклических нагрузжений порядка 2150 Н·м и момента на преодоление сил трения свеклы о режущие грани порядка 1150 Н·м они подвергаются интенсивному усталостному разрушению, которое распределено по длине грани на расстоянии от 3 до 15 мм, что подтверждается данными дефектного анализа. На этом основании возникает необходимость конструктивного упрочнения граней ножа, которое следует осуществить на расстоянии 1,5–2,0 толщины грани от режущей кромки.

Повышать усталостную прочность предложено по схеме, защищенной патентом на полезную модель и представленной на рисунке 36 [115] и в приложении Б.

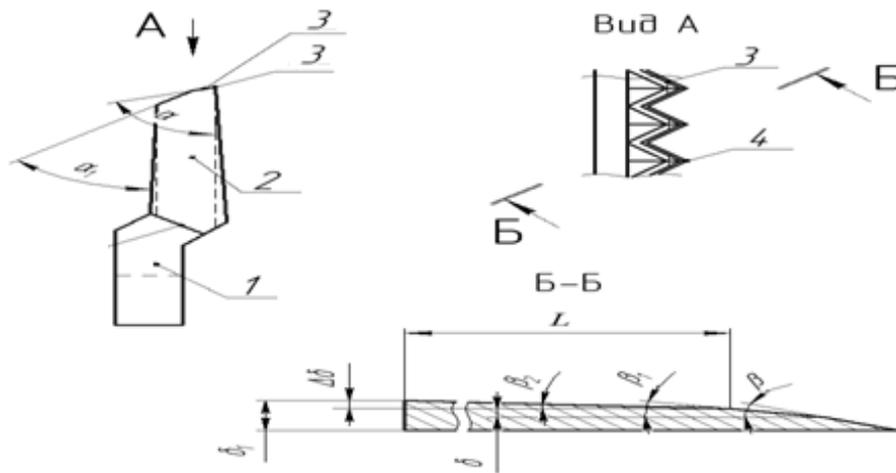


Рисунок 36 – Конструкция ножа с упрочненными дном и вершиной грани:

1 – привалочная крепежная плоскость; 2 – кромка ножа; 3 – грань ножа; 4 – вершина

Нож состоит из двух частей – привалочной крепежной 1 и рабочей режущей 2. Количество граней и их расположение в режущей части не претерпевают никаких изменений по сравнению с традиционно используемыми. Изменению подвергается лишь толщина сечения режущей грани на кромке. Она составляет 1,0 мм, а в дальнейшем по длине вводятся утолщения дна и высоты стенок грани.

Режущая кромка грани 3 выполнена с основным  $\beta = 8^\circ \dots 10^\circ$  и дополнительным углом  $\beta_1 = 4^\circ \dots 5^\circ$  заострения с вершиной 4, расположенной

на расстоянии 1,5–2,0 толщины сечения грани от режущей кромки 3. Последняя в свою очередь имеет основной  $\alpha$  и дополнительный  $\alpha_1$  углы наклона, выполненные также на расстоянии 1,5–2,0 толщины сечения грани от ее вершины, равной  $50^\circ \dots 60^\circ$ . Каждая грань имеет наклон  $2^\circ \dots 3^\circ$  от края вершины 4. Ее выполняют с дополнительным углом построения  $\beta_1$  под углом наклона  $\beta_2$  в сторону границы крепежной и рабочей частей грани. Вследствие этого толщина сечения режущей грани  $\delta$  приобретает равномерное приращение  $\Delta\delta = \delta_1 - \delta$  по длине  $l$  с максимальным значением  $\delta_1 = 1,2-1,5$  мм.

Нож данной конструкции с дополнительным углом наклона режущей грани  $\beta_2$  обеспечивает постоянное по длине грани приращение толщины сечения дна и вершины грани на величину  $\Delta\delta$ . Наличие переменного по длине дополнительного утолщения, линейно возрастающего от режущей кромки до основания граней, позволит значительно повысить выносливость на изгиб ножа с соответствующим увеличением показателей его безотказности и долговечности.

Новизна технического решения подтверждена патентом на полезную модель № 130542 «Свеклорезный нож».

Повышение ресурсных показателей ножа обеспечит более длительное качественное измельчение сахарной свеклы с уменьшением затрат на техническое обслуживание и замену.

## **2.8.2 Технологическое обеспечение утолщения дна и вершины граней**

Предложены два варианта получения граней ножей с утолщением дна и вершины от режущей кромки до основания – расточкой граней сборной фрезерной оправкой и пластическим деформированием граней накаткой.

### **2.8.2.1 Расточка граней сборной фрезерной оправкой**

Рассмотрим технологию, предусматривающую механическую обработку режущих граней в специальной оснастке (рисунок 37).

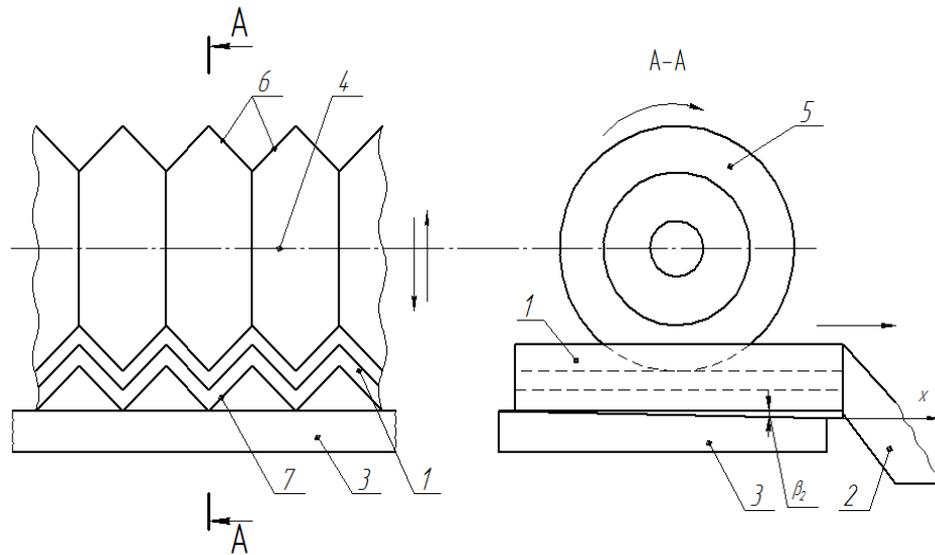


Рисунок 37 – Оснастка для фрезерования граней ножей  
усовершенствованной конструкции

Разработанная и исследованная оснастка предназначена для механической обработки заготовки, полученной штамповкой. В заготовке предусмотрены припуски в гранях, обеспечивающие утолщение дна и вершины граней от режущей кромки до основания. Заготовку ножа 1 крепят привалочной крепежной частью ножа 2 к основанию 3 установки с предусмотренным на угол  $\beta_2$  отклонением от горизонтальности стола вертикально-фрезерного станка. Сборная головка 4, состоящая из 21 фрезы с режущими гранями 6, полностью соответствующими конструкции впадин ножа 7, с двух установок обрабатывает грани ножа в двух плоскостях.

Соответствующим образом в сборной головке, состоящей из 21 заточного круга с угловыми плоскостями, осуществляется финишное шлифование стенок граней и режущих кромок.

Шлифовальная головка приспособлена и для проведения ремонтно-обслуживающих работ – для заточки режущих кромок ножей усовершенствованной конструкции.

### 2.8.2.2 Пластическое деформирование граней накаткой

Процесс прокатки граней ножа затрудняется их конструктивной сложностью. Наряду с тем, что их необходимо обработать по 40 граням ромбической формы, необходимо еще и обеспечить утолщение их дна и вершины на угол  $\beta_2$  в соответствии с рисунком 37. Анализом различных схем формообразования установлено, что наиболее рациональной является схема, предусматривающая прокатку граней в специальной вальцовой установке, на которую получен патент на полезную модель № 150113 «Устройство для изготовления режущего инструмента» [116] (приложение В).

С помощью макетирования (рисунок 38) изучена и предложена схема формообразования граней, состоящая из трех этапов.

На первом этапе (рисунок 38, *а*) нагретый до температуры 950...1050 °С нож устанавливается торцом крепежной поверхности в полость 1 вальцовой установки. Режущие грани находятся при этом в свободном состоянии в полости 2. При прокрутке вальцов 3 с обработанными деформирующими элементами 4 и 5, соответствующими форме и размерам передней и задней частей ножа, он жестко фиксируется от сдвигов и перемещений (рисунок 38, *б*).

Ромбовидные грани 6 и 7, изготовленные в порядке обратном, граням ножа, входят в зацепление. Деформирующие грани вальцовой установки изготовлены со смещением геометрической оси вальцов. Это позволяет за счет изменения кривизны окружности постепенно от минимума деформации в точке 8 до максимума деформации в точке 9 (рисунок 38, *в*) формировать переменную по длине толщину дна и высоту граней. На последнем этапе накатки обрабатываемый нож высвобождают из ручья накатных вальцов.

Рассмотренная схема формообразования предусматривает деформацию граней накатными элементами 6 и 7 прокатных вальцов 3. При этом предусмотренное утолщение дна и вершины граней обеспечивается за счет переменного радиуса кривизны деформирующих поверхностей вальцов [117–119]. Перемещение минимальное, в начальный период деформации (см.

рисунок 38, б), увеличивается линейно и достигает своего максимума на концах граней, образующих режущую кромку ножей (см. рисунок 38, в).

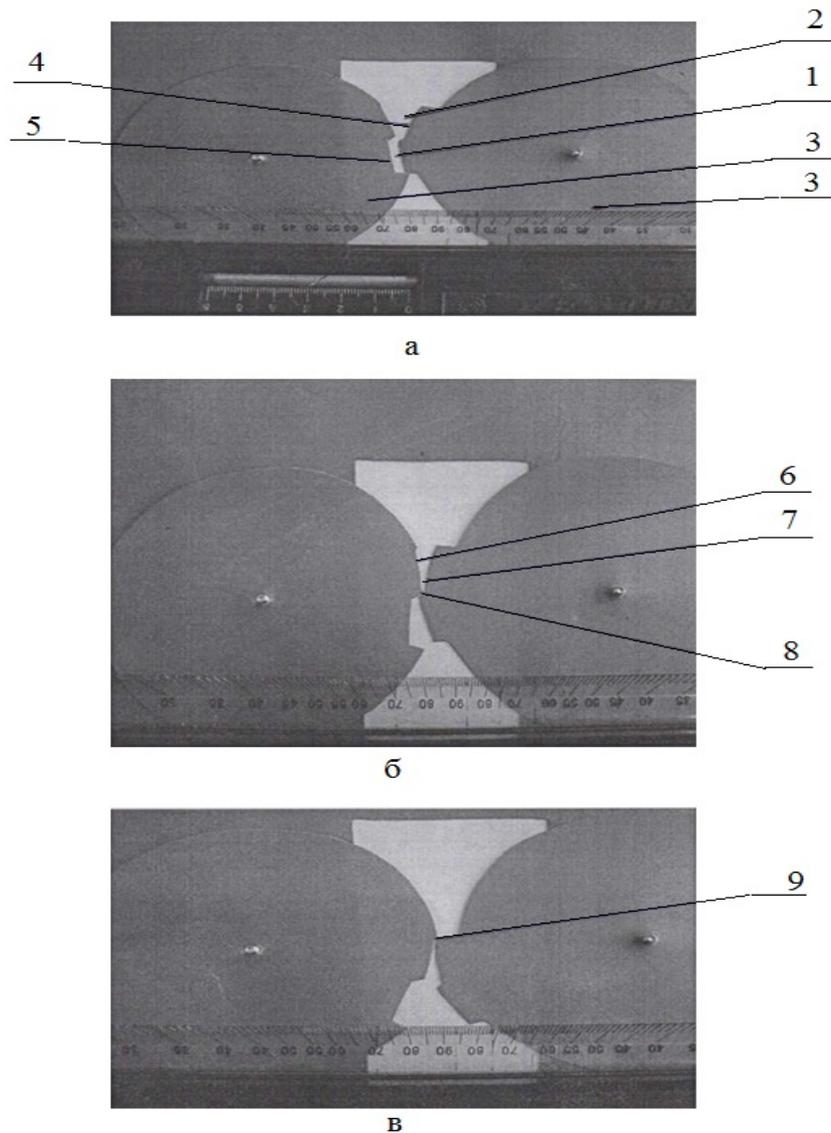


Рисунок 38 – Моделирование поэтапной прокатки при формообразовании и упрочнении граней

Практическая реализация схемы формообразования поэтапного пластического деформирования ножей прокаткой в системе валков при их восстановлении и упрочнении усложнена наличием двух плоскостей: режущей и установочной. Конструктивно это возможно в вальцовой установке с возвратно-поступательным перемещением деформирующих элементов. С целью упрочнения граней (рисунок 36) принято решение их

накатки с утолщением дна и вершин от минимума у режущей кромки и до максимума у основании граней.

Принята схема одновременного формообразования граней ножа, полученного в штамповой оснастке, в накатной установке со смещенными геометрическими осями валцов. За счет смещения осей валцов (рисунок 39) на деформирующих поверхностях создаются новые профили, на расстоянии  $L_1$  защемляющие привалочную поверхность ножа, а на расстоянии  $L_2$  деформирующие грани с приращением дна и высоты канавки от основания к режущей кромке [116].

Переменный радиус кривизны деформирующих элементов создается за счет эксцентриситета, образуемого смещением геометрической оси валцов  $O$  на расстояние  $O_1$ , по которому обрабатываются деформирующие поверхности (рисунок 39).

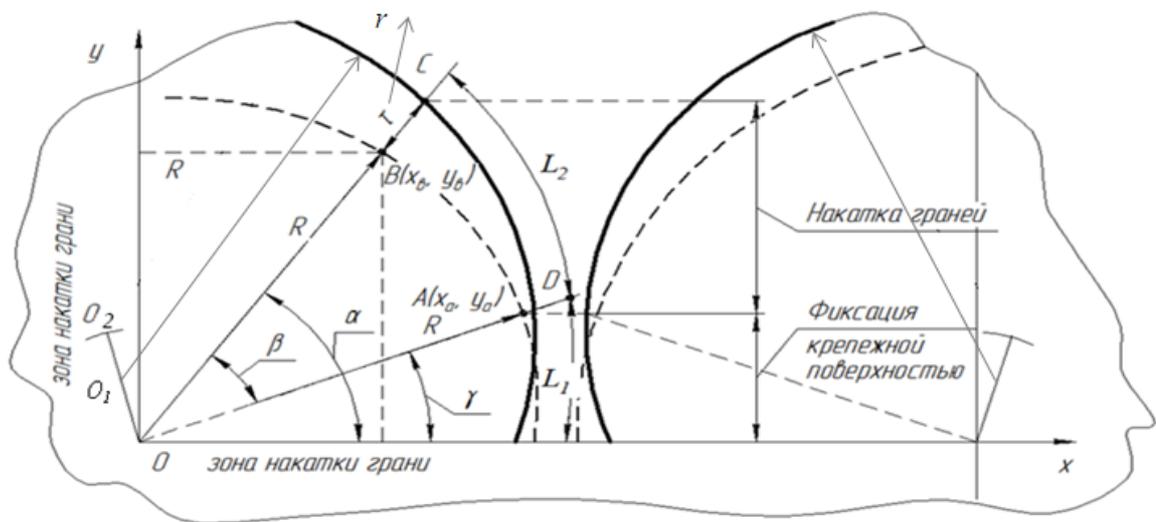


Рисунок 39 – Расчетная схема смещения осей валцов и деформирующих поверхностей

Начало процесса деформирования характеризуется расположением точки  $A$  с координатами  $A(x_0, y_0)$ . Эта точка получена от истинной геометрической оси  $O$ . В точке  $A$  завершается защемление ножа и начинается деформирование дна и высоты грани от ее основания. В точке  $B$  с координатами  $B(x_B, y_B)$  процесс деформирования завершается, длина  $L_2$

характеризует длину граней ножа. Размеры граней и их утолщение формируются за счет нового деформирующего профиля накатной поверхности, образуемого при смещении оси  $O$  на расстояние  $r$ , получаемое расчетом углов  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ . Получаемая точка  $O_1$  с координатами  $O_1(x_{o_1}, y_{o_2})$  исходя из известного уравнения окружности описывается выражением:

$$\begin{cases} (x_a + x_{o_1})^2 + (y_a + y_{o_1})^2 \\ (x_b + x_{o_1})^2 + (y_b + y_{o_1})^2 \end{cases} \quad (46)$$

Координата  $y_o$  выражается как

$$y_{o_1} = y_a \pm \sqrt{R^2 - (x_a - x_{o_1})^2}. \quad (47)$$

Координаты точки  $A$  и  $B$  определяются исходя из схемы рисунка 39:

$$x_a = R \sin \gamma; \quad y_a = R \cos \gamma; \quad (48)$$

$$x_b = -R(R + r) \sin \beta; \quad y_b = (R + r) \cos \beta. \quad (49)$$

Длины дуг равны:

$$L_1 = \frac{\pi R \alpha}{180^\circ}; \quad L_2 = \frac{\pi R \gamma}{180^\circ}. \quad (50)$$

И в итоге в зависимости от конструктивных размеров ножа углы  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  принимают вид:

$$\alpha = \frac{L_1 180^\circ}{\pi R}; \quad \gamma = \frac{L_2 180^\circ}{\pi R}; \quad \beta = (\alpha - \gamma) = \frac{(L_1 - L_2) \cdot 180^\circ}{\pi R}. \quad (51)$$

В процессе теоретическим анализом схемы формообразования выражения (48), (49), (50) и (51) являются исходными для проектирования конструкции деформирующих элементов со смещенными геометрическими осями. Это

позволит сформировать режущие грани свеклорезных ножей накаткой с повышенными показателями износостойкости и выносливости на изгиб. Такое повышение обуславливается эффектом упрочнения, протекающим при прокатке режущих граней, и созданием утолщений дна и высоты грани.

### **Выводы**

Теоретически изучены и установлены:

- характеристики рабочего процесса измельчения сахарной свеклы в центробежной свеклорезной установке, позволяющие оценить его физико-механические особенности;
- напряженное состояние граней ножа от крутящего момента, характеризующего процесс измельчения сахарной свеклы с позиции технического состояния режущих кромок граней ножа, зависимости качества измельчения от параметров наработки на отказ по качественному показателю свекловичной стружки;
- напряженное состояние граней ножа от ударных центробежных воздействий измельчаемой свеклы, ведущее к их усталостным поломкам;
- конструктивно-технологические направления упрочнения граней и режущих кромок ножа методами, предусматривающими пластическое деформирование.

### 3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основании принятой в подразделе 1.6 программы исследований экспериментальному анализу подвергались вопросы, направленные на изучение внешних (макрогеометрия, твердость и микротвердость) и внутренних (микроструктура, остаточные напряжения и плотность дислокационных явлений) характеристик свеклорезных ножей, определяющих их износостойкость и выносливость на изгиб, а также эксплуатационные характеристики (наработка на отказ, долговечность и качественные показатели стружки).

#### 3.1 Методика исследования процесса штамповки и прокатки при восстановлении и упрочнения граней ножа

Для достижения цели исследования, предусматривающей разработку технологий восстановления деформированных и упрочнения режущих граней, и в соответствии с принятой схемой формообразования теоретически установлены форма и размеры заготовки, учитывающие строго определенный объем металла, обеспечивающий получение привалочной и режущей плоскостей с ромбовидными гранями. При этом рассчитаны усилия деформации, за счет чего практически протекает процесс штамповки и накатки.

Процесс пластической деформации управляется и контролируется такими факторными показателями, как усилие деформации  $P$  с распределением по осям  $x$  и  $y$ , температура нагрева детали  $T$ , а также скорость деформации.

Усилие деформации устанавливали и контролировали тензорезисторным датчиком, а по мере остуживания детали – показателями падения давления пресса от 280 до 260 МПа манометром.

Температуру регистрировали по показателям начальной температуры, контролируемой пиропатроном, установленным в расплав соли  $BaCl_2$ . Верхний предел нагрева составлял 1150 °С, глубину прогрева оценивали временем нахождения заготовки в расплаве соли.

Скорость деформирования изменяли от 0,04 до 0,16 м/с, интервал варьирования был принят равным 0,02 м/с, степень деформации – 0,1.

Количество повторов каждого эксперимента принималось равным трем, что, согласно [120, 121], позволяет обеспечить 95%-ю достоверность результатов опытов.

При штамповке заготовок контролировали формообразование привалочных и режущих поверхностей ножей и их соответствие геометрической форме и конструктивным параметрам. Качество устранения кривизны режущей плоскости при восстановлении фиксировали их прямолинейностью.

### 3.2 Методика микрометражных исследований

Микрометражным исследованиям подвергали режущие грани ножей с целью установления поэтапного изменения их геометрических параметров. Изучали как режущие кромки, так и качество формирования класных поверхностей ножа, наличие припусков на финишную механическую операцию и прокатку.

Количественно выборке подвергали по 24 продефектованных ножа после каждой операции штамповки и механической обработки.

При контроле дефектных ножей проверяли глубину износа режущих кромок по месту максимального износа по длине грани ножа после сменной наработки. Контроль длины  $l$  грани осуществляли штангенциркулем ШЦ-П-250-0,05, ГОСТ 166–80, толщину грани  $h$  – микрометром МК-7, а сплюсненность граней  $H$  – визуально по месту наличия максимальной сплюсненности с последующей фиксацией ее величины (рисунок 40).

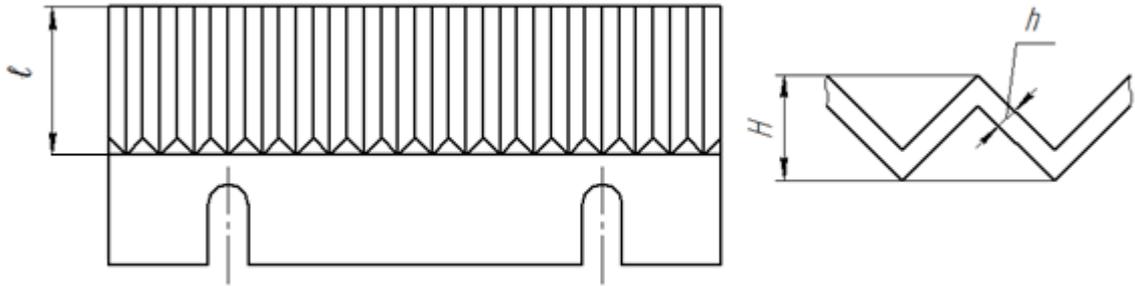


Рисунок 40 – Контроль изношенных поверхностей по месту наличия максимальной сплюсненности

Наличие усталостных разрушений фиксировали визуально с последующим замером глубины разрушения по длине режущей грани.

Шероховатость поверхностей режущих граней контролировали по образцам шероховатости согласно ГОСТ 9378–73.

### 3.3 Методика микро- и макроструктурных исследований

При микро- и макроструктурных исследованиях в первую очередь оценивали состояние поверхностей, воспринимающих значительные напряжения на изгиб, моменты от трения скольжения измельчаемого корнеплода о режущие грани. Они позволяют судить об устойчивости режущего инструмента по показателям выносливости на изгиб и изнашивание. Во вторую очередь определяли технологическое и конструктивное воздействие на инструмент, явления, обеспечивающие упрочнение структуры.

Исследования проводили с целью изучения режимов процесса горячей пластической деформации и их воздействия на характер структурного состояния металла. При направленном пластическом деформировании блоки мозаичной структуры дробятся, что ведет к значительным изменениям состояния металла. Наряду с этим возникает волокнистая непрерывная структура, позволяющая также позитивно воздействовать на состояние металла и параметры износостойкости и выносливости на изгиб граней ножа.

Металлографические исследования проводили с помощью электронного микроскопа МИМ-8М.

Шлифы выполняли в соответствии с требованиями, указанными в [122–124].

### 3.4 Методика исследования показателей твердости

Показатель твердости материала позволяет оценивать такие эксплуатационные параметры ножей, как износостойкость, режущая способность, обрабатываемость шлифованием и резанием. Наряду с этим твердость поверхности дает возможность косвенно оценивать предел прочности и выносливость на изгиб режущих граней.

Поверхностную твердость режущих граней ножа исследовали по методу Роквелла [125]. При этом использовали шкалу *C* для твердых материалов.

Для оценки прочности параметров режущих граней ножа целесообразен анализ показателей по глубине упрочненного слоя методом определения микротвердости, основанным на вдавливании алмазной четырехгранной пирамиды в шлиф среза контролируемой поверхности с интервалом 0,25 мм по глубине.

Микротвердость деформированной поверхности проверяли прибором ПМТ-3 путем замера увеличенного отпечатка на микроскопе и последующего расчета по формуле [126]:

$$H_{\mu} = P/F, \quad (52)$$

где  $P$  – нагрузка на алмазную пирамиду, Н;

$F$  – площадь поверхности отпечатка,  $\text{м}^2$ .

### 3.5 Методика исследования физических показателей

Физическими показателями, характеризующими процесс упрочнения граней свеклорезных ножей, определяли вид, характер и абсолютные показатели распределения остаточных напряжений и плотности дислокаций при деформации.

Пластическая деформация, основанная на приложении к материалу

деформируемой поверхности внешних нагрузок, сопровождается остаточными напряжениями первого рода. Эти напряжения имеют ориентированные направления, зависящие от линий скольжения металла при пластической деформации. Дислокации характеризуют несовершенства кристаллической решетки и в зависимости от показателя обуславливают упрочняющие или разупрочняющие процессы при деформации металла.

### 3.5.1 Методика исследования остаточных напряжений

Остаточные напряжения первого рода, охватывающие области, соизмеримые с размерами детали, наиболее точно определяются рентгеноструктурным способом. Исследованиями [127–136] установлено, что этим способом определимы не только количественные показатели остаточных напряжений, но и их ориентация, связанная с формой детали. При этом знак напряжений определяет характер расположения однородных дислокаций.

Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре ДРОН-3.0 с Fe-K $\alpha$  – излучением в режиме «запись диаграммы» со скоростью движения ленты 800 мм/ч, предел измерения  $10^{2...4}$  имп/с, предел 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  $1^\circ$ , напряжении на трубке  $U = 20$  кВ, анодном токе  $I_a = 10$  мА, отражении (110);

– аналитические рефлекс эталона также определяли при отражении (110),  $V = 0,5$  град. /м и шаге сканирования  $0,05^\circ$ , напряжении на трубке  $U = 20$  кВ, анодном токе  $I_a = 10$  мА.

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

$$\Sigma \varphi = -(\sigma_1 + \sigma_2)(\mu E), \quad (53)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – напряжения в двух главных направлениях;

$\mu$  – коэффициент Пуассона.

Напряжение каждого из направлений:

$$\sigma = \frac{\Delta\alpha}{a} E, \quad (54)$$

где  $\frac{\Delta\alpha}{a}$  – 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 по схеме, представленной на рисунке 41.

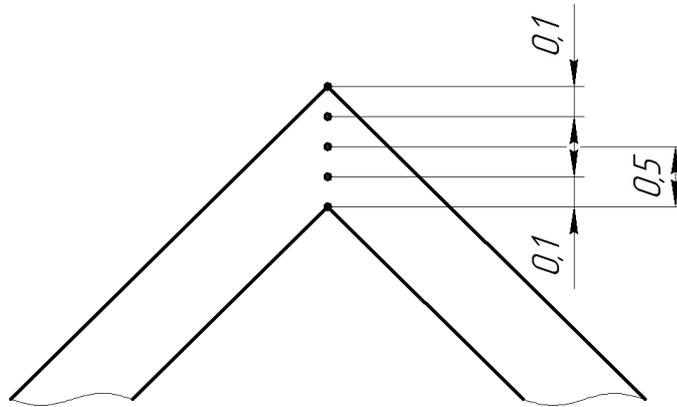


Рисунок 41 – Схема замера остаточных напряжений

### 3.5.2 Методика исследования плотности дислокаций

Плотность дислокаций, характеризующая искажения кристаллической решетки материала ножа при пластической деформации, исследовали в соответствии с рекомендациями, представленными в справочнике [134].

Рентгеноструктурным исследованиям подвергали субмикронапряжения, дающие характеристику ориентации, связанной со структурой атомной решетки [135–137].

Число линий дислокаций, проходящих через единицу площади, и, соответственно, состояние субмикронапряжений определяли методом квадратичной зависимости плотности дислокаций  $\rho$  от истинного уширения линии  $\beta$  на рентгенограмме:

$$\rho = A\beta^2, \quad (55)$$

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

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

$$\frac{\Delta\alpha}{a} = \frac{\beta}{4\text{tg}V_{\text{HKL}}}, \quad (56)$$

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

### 3.6. Методика ресурсных испытаний

Ресурс ножей центробежных свеклорезок, как было определено в разделах 1 и 2, обеспечивается сопротивлением изнашиванию и выносливостью на изгиб рабочих поверхностей режущих граней.

#### 3.6.1 Испытания выносливости на изгиб

При разработке методики исследования сопротивления режущих граней усталости учитывали рекомендации, приведенные в ГОСТ 25.504–82 и других источниках [138–140], основанные на расчетных методах обоснования конструкции элементов машин. В работе использован экспериментальный метод, базирующийся на вибрационных нагружениях граней ножа. Для этих целей была использована вибрационная установка ВУ 5/5000, обеспечивающая режимные характеристики, вполне удовлетворяющие условиям измельчения сахарной свеклы в центробежной установке:

- диапазон изменения частоты колебаний 5...5000 Гц;
- максимальное ускорение процесса устойчивости на изгиб  $g_{\text{max}} = 20 \text{ Н/см}^2$ ;
- максимальная амплитуда колебаний  $A_{\text{max}} = 3/1,8 \text{ мм}$ ;

– масса испытываемых деталей – до 5 кг.

Испытуемый нож *1* (рисунок 42) устанавливали привалочной плоскостью *2* на специальное приспособление *3* на столе вибростенда.

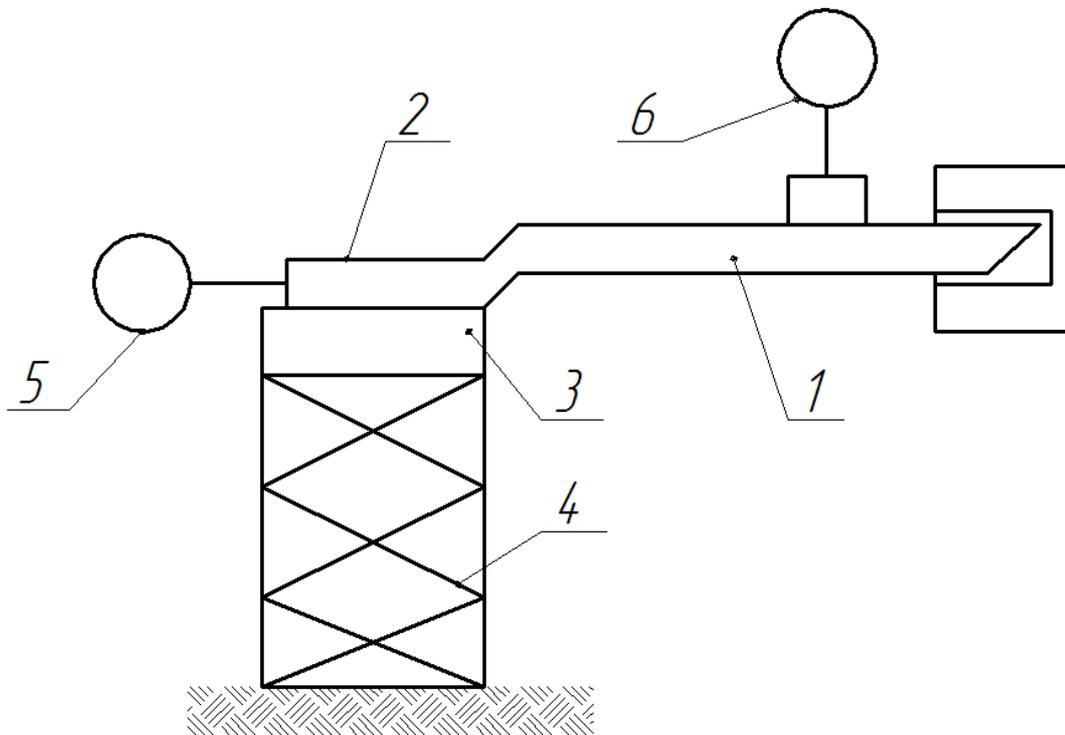


Рисунок 42 – Схема установки для исследования выносливости на изгиб

Частоту колебаний, создаваемых вибратором *4*, фиксировали и устанавливали датчиком вибратора *5* и измерительным прибором *6*. Время испытаний – до момента появления разрушений режущих граней ножа. Параметры выносливости на изгиб определяли сравнением данных серийного и экспериментального упрочненных ножей.

### 3.6.2 Испытания на износостойкость

Износостойкость экспериментальных ножей исследовали в соответствии с рекомендациями, установленными ГОСТ 30480–97 [141] по циклу ускоренных испытаний на износостойкость. При этом решалась задача выбора наилучших конструктивно-технологических решений и оценки

безотказности и долговечности экспериментальных ножей для измельчения сахарной свеклы.

При лабораторных испытаниях использовали метод моделирования условий внешнего воздействия с оценкой фрикционно-износных характеристик пары трения «ролик – колодка» на машине трения по схеме, представленной на рисунке 43.

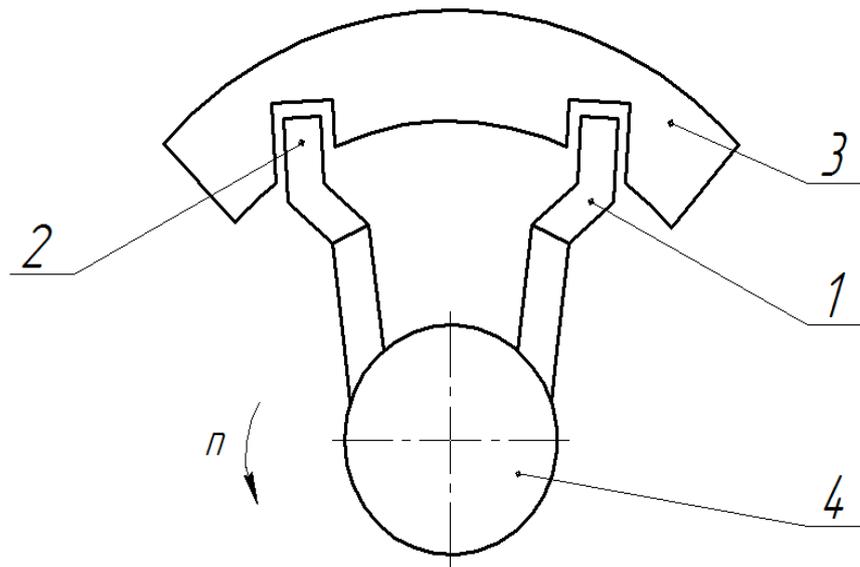


Рисунок 43 – Схема установки для испытаний ножей на износостойкость

Истиранию одновременно подвергались два ножа – экспериментальный 1 и эталонный 2, в качестве которого служили нож, используемый в производстве. Ножи фиксировали в специальной колодке 3, обеспечивающей их постоянный прижим к ролику 4, изготовленному из конструкционной подшипниковой стали ШХ-15, закаленной до твердости HRC65.

Для охлаждения использовали 5%-й раствор соляной кислоты, имитирующий кислую окружающую среду.

### 3.6.3 Производственные испытания

Эксплуатационным испытаниям в реальных производственных условиях на ОАО «Балашовский сахарный комбинат» подвергали ножи, установленные в 12-рамную свеклорезную установку центробежного типа.

В качестве объектов исследования приняты:

- ножи свеклорезные серийные, соответствующие ТУ 3-750003–27–94, изготовленные на Луганском механическом заводе фрезерованием крепежной, привалочной и многогранной режущей плоскостей из стали У7;
- ножи свеклорезные серийные с устраненными короблениями;
- ножи свеклорезные экспериментальные, изготовленные по параметрам, описанными в патентах № 130542 и 150113, с упрочненными режущими гранями из износо- и коррозионностойкой стали 40Х13.

С целью создания идентичных условий испытаний центробежную свеклорезную установку комплектовали двухножевыми рамками с ножами по схеме: 1, 3, 5, 7 – рамками с серийными и 2, 4, 6, 8 – рамками 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. На заводе дефектацию проводили по шаблону, на котором установлены линии: желтая характеризует допустимый износ, а красная – предельный (таблица 6).

Таблица 6 – Карта дефектации ножей при эксплуатации

Периодичность проверок, ч	Количество перезаточек режущих кромок по шаблону		Усталостные повреждения, мм
	желтая линия	красная линия	
12	Допустимое	Предельное	3
24	количество	количество	
36	перезаточек 4–5	перезаточек 5–6	
48	Величина уменьшения	Величина уменьшения	
60	длины режущей	длины режущей	
72	кромки при перезаточке 1,0–1,2 мм	кромки при перезаточке 1,0–1,2 мм	

### **3.6.4 Методика оценки достоверности зависимости качественных показателей свекловичной стружки от технического состояния ножей**

Как было установлено анализом видов, последствий и критичности отказов системы измельчения сахарной свеклы в стружку, основным элементом, обеспечивающим качество измельчения, является нож. Износостойкость режущих кромок и выносливость на изгиб граней в плоскости режущей части и зависимость от них длины и проницаемости стружки по результатам эксплуатационных испытаний позволяют оценить критичность отказов и достоверность результатов испытаний. Данные оценочные показатели являются резюмирующими для всего цикла лабораторных и эксплуатационных исследований.

Обработку результатов экспериментальных исследований осуществляли по программе MS Excel из пакета программ Microsoft Office с использованием метода наименьших квадратов и с построением регрессионных уравнений первого порядка [142].

Для того, чтобы не зависеть от размерности исходных данных, для характеристики качества регрессионного уравнения вычисляли коэффициент детерминации  $R^2$ :

$$R^2 = SS_{\text{рег}}/SS_{\text{общ}}. \quad (57)$$

Расчеты статистических оценок коэффициентов уравнений регрессии с неизвестными  $y$  – износ ножей и  $x$  – время работы осуществляли со стандартными 95%- и 99%-ми доверительными интервалами.

При исследовании закономерности распределения вероятности использовали выражение закона нормального распределения вероятности:

$$\left( x - t \frac{S}{\sqrt{n}} \leq \alpha \leq x + t \frac{S}{\sqrt{n}} \right), \quad (58)$$

где  $x$  – выборочное среднее значение доверительного интервала;

$t$  – параметр Стьюдента,  $t = t(\alpha, n - 1)$ ;

$\alpha$  – уровень значимости при доверительной вероятности  $\beta$ ;

$S$  – выборочный стандарт отклонения;

$(n - 1)$  – число степеней свободы.

Кубические регрессионные уравнения показателя проницаемости стружки по циклам испытаний принимались в виде:

$$p = a + ct^2 + \alpha t^3. \quad (59)$$

Для вычисления стандартной ошибки аппроксимации исходных точек  $S_e$  и составления таблицы коэффициентов использовали выражение:

$$SS_e = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{n - 2}; \quad S_e = \sqrt{SS_e}, \quad (60)$$

где  $y_i - \hat{y}$  – отклонение исходной точки  $y_i$  от сглаженного значения  $y$ , вычисленного по регрессионному уравнению.

## **Выводы**

1. Процесс пластического деформирования по параметрам температуры нагрева, усилия и скорости деформирования исследован с применением программы Mathcad PLUS 8.0.

2. Прочностные и износостойкие показатели исследовали по ГОСТам путем сравнительных испытаний экспериментальных и используемых в производстве ножей.

3. Обработку результатов экспериментальных исследований осуществляли по программе MS Excel из пакета программы Microsoft Office.

## **4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **4.1 Обоснование режимов пластической деформации ножей**

Основными показателями обработки давлением заготовок в штамповой оснастке являются технологические режимы, характеризующие температуру преддеформационного нагрева, усилие и скорость деформации. Только при их оптимальных значениях возможно получить нож с повышенными показателями геометрической формы, размеров поверхностей, сопротивления износу и усталостному разрушению.

Экспериментальные исследования штамповой оснастки проводили в соответствии с рекомендациями В.Е. Маслова и В.Н. Шаповала [143].

Исследования температуры преддеформационного нагрева основывались на условии использования высоких пластических свойств материала в начале процесса деформации и их обеспечения в течение всего периода деформации с учетом остуживания. При этом важным рубежным фактором принималось обеспечение конструктивных формы и размеров ножа и упрочнения режущих граней. Результаты эксперимента приведены в таблице 7.

Исходя из данных 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 разупрочняюще на структуру металла.

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

Таблица 7 – Экспериментальная оптимизация режимов пластической деформации

Температура преддеформационного нагрева, °С	Усилие деформации, кН	Скорость деформирования, м/с	Качество формообразования
800	1150	0,0017	Не до конца сформирован раздел привалочной и режущей плоскостей, не выдержана ромбическая форма граней
850	1150	0,0028	Раздел плоскостей сфор- мирован, более качест- венное образование ромбической формы граней
900	1100	0,0021	Формообразование каче- ственное, ромбовидная форма граней соблюдена
950	980	0,0018	Формообразование каче- ственное, ромбовидная форма граней соблюдена
1000	750	0,00085	Формообразование каче- ственное, ромбовидная форма граней соблюдена
1050	530	0,00075	Формообразование каче- ственное, ромбовидная форма граней соблюдена
1100	400	0,00064	Формообразование каче- ственное, ромбовидная форма граней соблюдена

При обработке полученных экспериментальных данных, выполненной по рекомендациям [144–145], получена регрессионная модель, адекватно описывающая зависимость усилия деформации от температуры нагрева и скорости деформирования (приложение Г).

## 4.2 Результаты микрометричных исследований

В отличие от принятой технологии изготовления ножей, основанной на механической обработке привалочной и режущей плоскостей из пластины толщиной 12 мм и с размерами, полностью соответствующими конструктивному (рисунок 44), по исследованной технологии ножи формировали из заводских заготовок толщиной 5 мм и размерами, представленными в приложении Д.



Рисунок 44 – Нож, изготовленный механической обработкой

Исходя из рисунков 44–47, можно констатировать более чем двукратное повышение коэффициента использования материала по предлагаемой технологии.

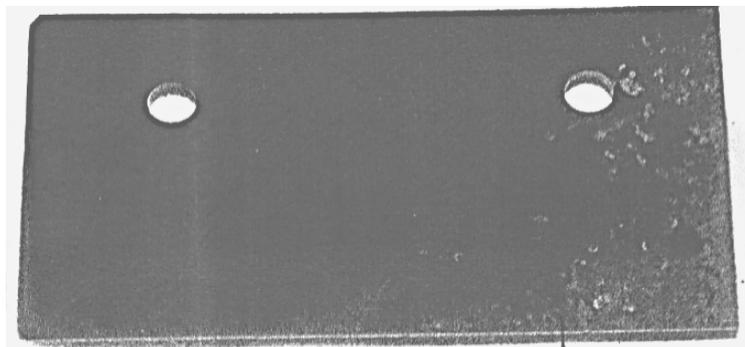


Рисунок 45 – Заготовка для формообразования ножа с ромбовидными режущими гранями

При высадке заводской заготовки ромбовидный профиль режущих граней обеспечивается гранями матрицы и пуансона. При этом они конструктивно выполнены так, что при формообразовании 5-миллиметровая пластина повторяет профиль граней и в режущей плоскости она возрастает по высотам двусторонних ромбов до 9 мм (рисунок 46).

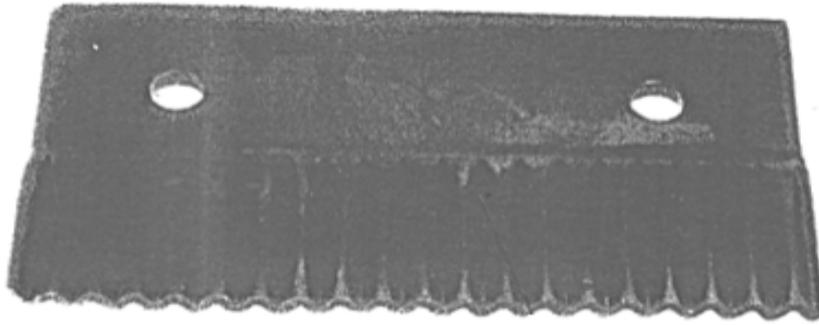


Рисунок 46 – Формообразование режущих граней с припусками на финишную операцию механической обработки

В размерах деформирующих граней заложены одномиллиметровые припуски, позволяющие произвести расточку режущих граней толщиной до 1 мм (рисунок 47).

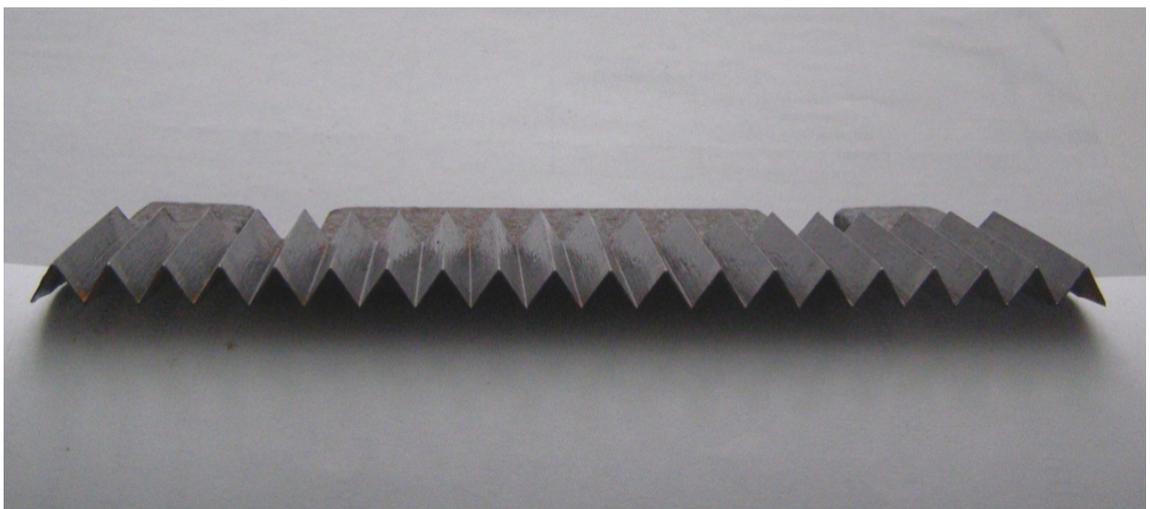


Рисунок 47 – Нож с расточенными режущими гранями

Таким образом, заготовка толщиной 5 мм при высадке по принятой схеме

формообразования полностью обеспечивает формирование граней ромбовидной формы. Создаваемые при посадке припуски 2 мм достаточны для финишной расточки и шлифования (приложение Г).

### 4.3 Результаты микро- и макроструктурных исследований

Пластическое воздействие на металл при различных режимных показателях сопровождается упрочняющими или разупрочняющими последствиями. В связи с этим микроструктурное состояние режущих плоскостей ножа является характеризующим при назначении схемы формообразования и режимов деформации.

Микроструктурное состояние режущих граней исследуемых ножей характеризуется скрытнокристаллическим мартенситом с карбидами хрома (рисунок 48).

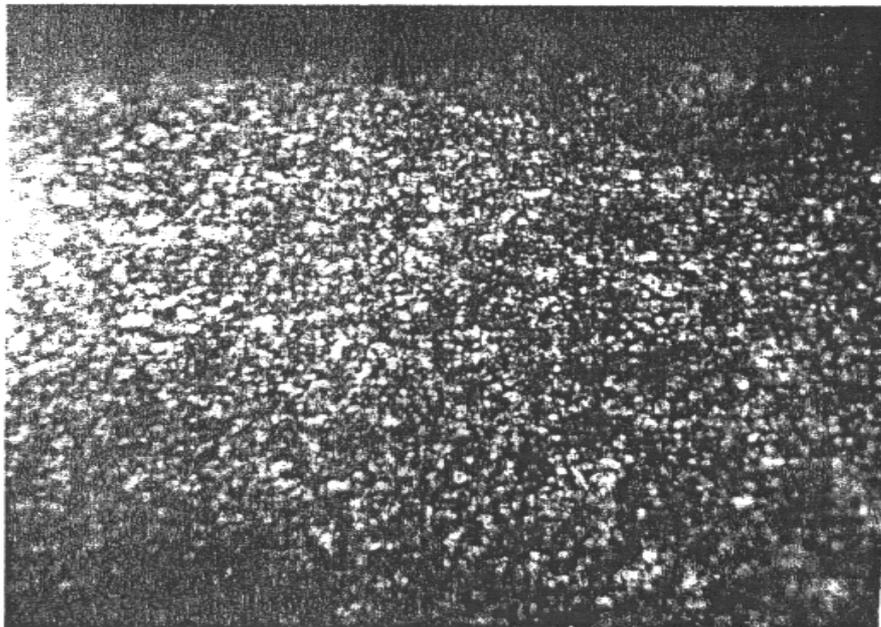


Рисунок 48 – Микроструктура исследуемых ножей ( $\times 300$ )

Микроструктура режущих плоскостей ножей, изготовленных по традиционной технологии, представляет собой грубоигольчатый мартенсит (см. рисунок 49).

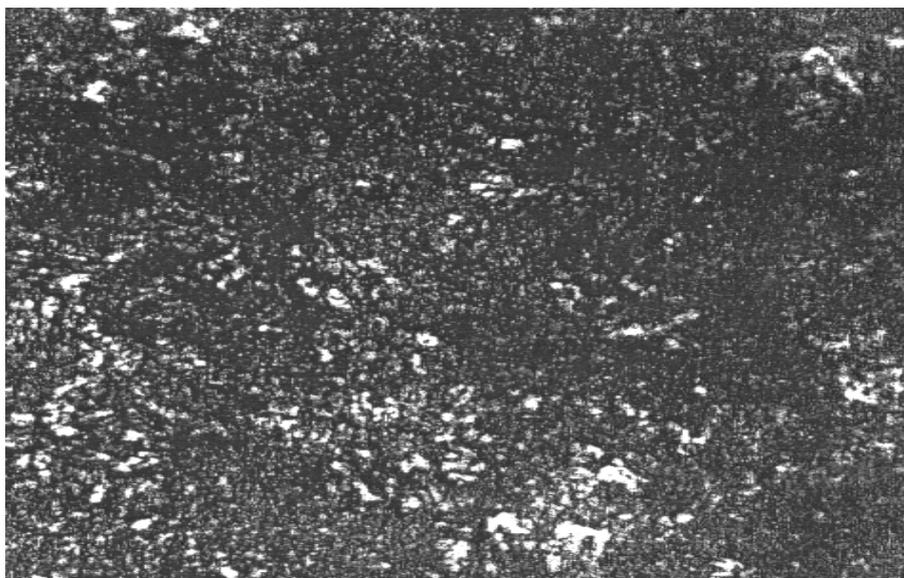


Рисунок 49 – Микроструктура серийных ножей ( $\times 300$ )

Таким образом, налицо явный общий упрочняющий эффект исследуемой технологии по всему сечению граней ножа.

Упрочнение структуры также обуславливается 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 ножа. Несомненно, это ведет к повышению износостойкости и выносливости граней на изгиб.

Макроструктура граней ножа, исходя из данных микроструктурного анализа, непрерывно повторяет направление сдвига и характеризуется волокнистостью по всему ромбическому профилю.

#### **4.4 Анализ механических показателей упрочнения граней**

В связи с конструктивными особенностями ножей свеклорезных установок режущие грани толщиной 0,8...1,0 мм при термомеханической обработке прокаливаются насквозь, поэтому вполне достаточно принять замеры в трех точках, характеризующих крайние и средние состояния грани.

Показатели микротвердости, наиболее достоверно характеризующие прочностное состояние режущих граней по их сечению, а также

сопротивляемость режущих кромок изнашиванию, позволяют сделать вывод о позитивном воздействии процесса деформации ножей.

Сравнительные показатели микротвердости представлены на рисунке 50.

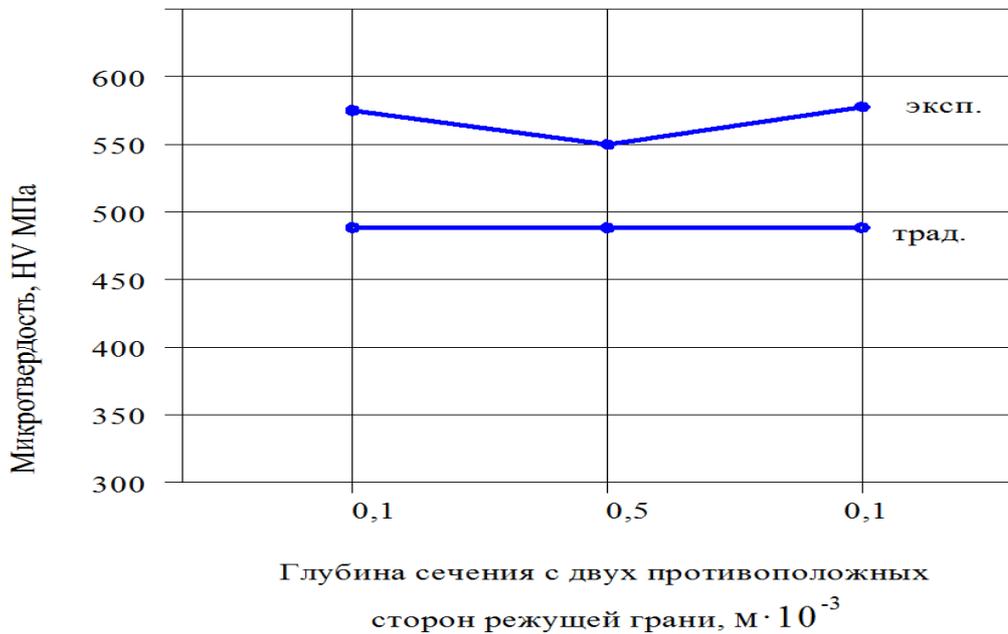


Рисунок 50 – Показатели микротвердости сечения режущей грани

Микротвердость в краевых участках граней экспериментальных ножей достигает 580 МПа, а у граней ножей, изготовленных по традиционной технологии, – 485 МПа. Это обстоятельство подтверждает наличие эффекта упрочнения при прокатке на 27 %. Характерным является и распределение микротвердости по глубине слоя. У серийного ножа она одинакова по всей толщине сечения, а у экспериментального – снижается на 40 МПа (рисунок 51). Это свидетельствует о более плотном строении зерен по краям грани, объясняемым процессом двойникования в конце высадки, что подтверждается иллюстрацией микроструктуры (рисунок 51, приложение Е).

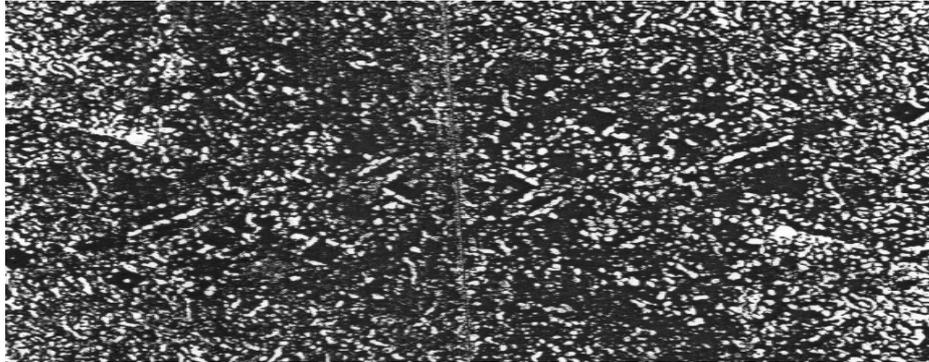


Рисунок 51 – Изменение микротвердости по глубине слоя ( $\times 225$ ;  $P = 200^\circ$ ;  $136^\circ$ )

Несколько сниженная микротвердость в центре сечения грани позволит повысить ее стойкость к образованию субмикротрещин. Ввиду незначительной толщины ножа и полного прокаливания граней показатели поверхностной твердости находятся в пределах 55–60 HRC<sub>Э</sub>.

#### **4.5 Анализ физических показателей упрочнения граней**

Основные эксплуатационные свойства ножей свеклорезных центробежных установок зависят от их износостойкости и прочности, которые, в свою очередь, формируются за счет поверхностного и объемного состояния, обусловленного принятой технологией обработки.

Исходя из этого, при анализе физических показателей исследовали внутреннее и внешнее состояние металла и поверхностей, позволяющее в целом оценить принятые технические и технологические решения.

Остаточные напряжения возникают в процессе обработки и остаются после ее окончания. В данном случае исследовали технологические остаточные напряжения, возникающие и остающиеся в ноже при пластической деформации металла в горячем состоянии и уравнивающиеся в макрообъеме граней ножа. В зависимости от принятого направления деформации они имеют ориентированное направление и представляют собой напряжения сжатия, ведущие к упрочнению, или напряжения расширения, вызывающие разупрочнение обрабатываемых поверхностей.

При анализе рентгеноструктурных данных установлено, что в соответствии с принятой и исследованной схемой формообразования в режущих гранях после пластической деформации возникают напряжения сжатия, имеющие небольшие расхождения значений по глубине слоя.

Остаточные напряжения у серийных ножей имеют принципиально отличное направление, так как возникают от напряжений резания и закалки, возникающих при термической обработке ножа.

Картина сравнительного распределения остаточных напряжений у экспериментальных и изготовленных по традиционной технологии ножей представлена на рисунке 52.

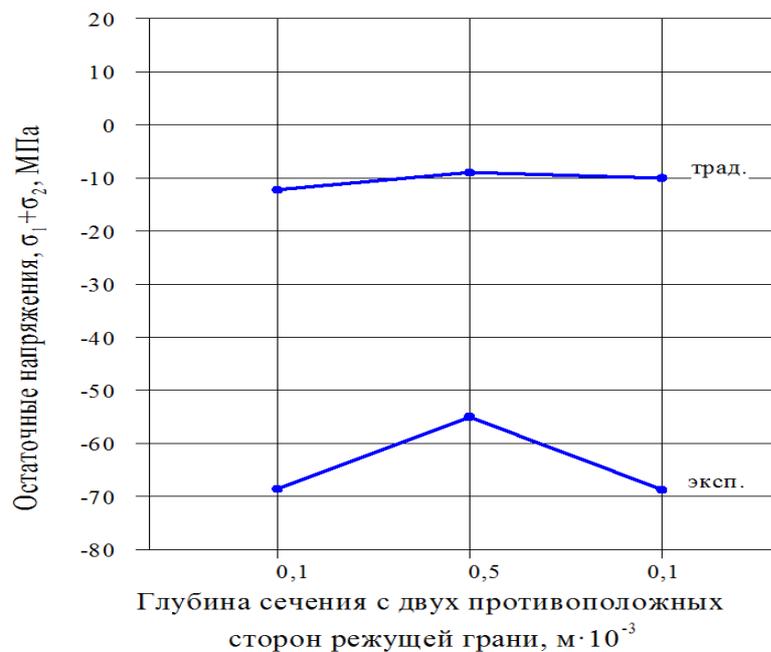


Рисунок 52 – Распределение остаточных напряжений

Из рисунка 52 следует, что при высадке граней ножа по всему их сечению возникают остаточные напряжения сжатия, достигающие по краям режущей плоскости 68 МПа, что более чем в 5 раз превышает напряженное состояние серийных ножей. Это свидетельствует об упрочнении режущих граней, что позволяет говорить о повышении износостойкости режущих кромок и выносливости граней на изгиб.

Смещения атомных плоскостей или дислокаций относятся к линейным дефектам. Установлено [147], что в недеформированных кристаллах металлов плотность дислокаций на  $1 \text{ см}^{-2}$  достигает  $10^6$ – $10^8$ , а у пластически деформированных при сдвиге возникают новые дислокации, многократно увеличивающие плотность дислокаций и, соответственно, изменяющие механические характеристики деталей. При этом верхними критериальными значениями числа дефектов, при которых протекает процесс упрочнения после пластической деформации, принимались значения  $10^{12}$ – $10^{13}$  на  $1 \text{ см}^{-2}$ .

Сравнительный анализ искажения кристаллической решетки, характеризующий упрочнение металла при пластической деформации ножей, представлен на рисунке 53.

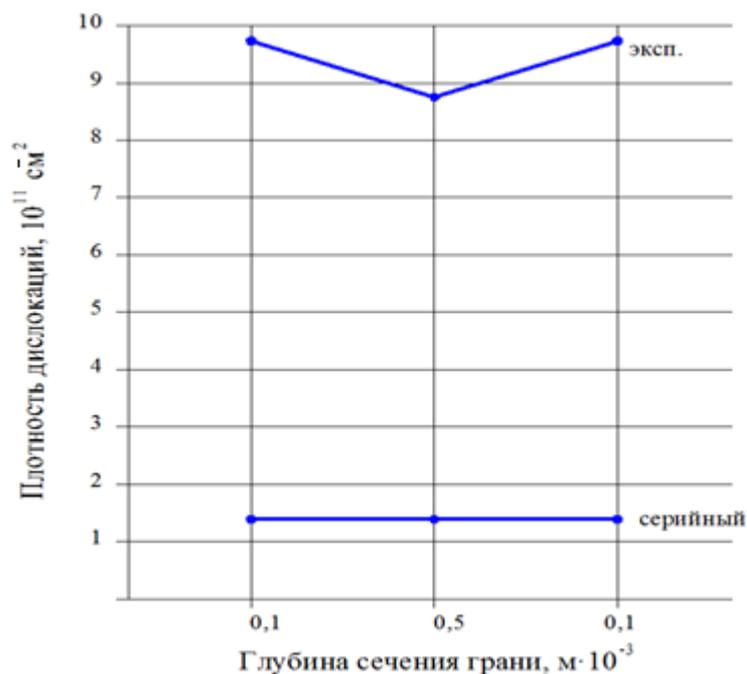


Рисунок 53 – Плотность дислокаций по глубине слоя режущей грани

При формообразовании и накатке режущих граней на границах зерна металла, состоящего из отдельных мозаичных блоков, сориентированных относительно друг друга под тангенциальным углом линии сдвига, возникают скопления дислокаций. Их показатели у граней экспериментальных 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 %.

Данное субмикросостояние деформированного металла характеризует принятую технологию как упрочняющую и обосновывает повышение прочностных характеристик граней ножа.

Наряду с этим, исходя из крайних критичных значений, составляющих  $10^{13} \text{ см}^{-2}$ , процесс деформации протекает таким образом, что фактическое состояние показателей плотности дислокаций не может привести к зарождению приграничных дефектов, ведущих к разупрочнению граней ножа.

#### **4.6 Исследование показателей, характеризующих ресурсные параметры ножей**

Средний ресурс исследуемого объекта характеризуется его наработкой от начала эксплуатации до достижения предельного состояния, когда дальнейшая эксплуатация должна быть (для нашего случая) прекращена по причинам [148]:

- резкого ухудшения функциональных и параметрических показателей, характеризующих ухудшением качества выпускаемой продукции, снижением объема ее выпуска, значительными ресурсными потерями;
- экономической нецелесообразности выпуска продукции вследствие резкого повышения стоимости ее производства и рыночной неконкурентоспособности.

Данный оценочный критерий характеризует безотказность и долговечность ножей для измельчения сахарной свеклы. При анализе их дефектного состояния, представленном в подразделе 1.3, установлено, что преобладающими факторами, ведущими к эксплуатационным отказам и предельному состоянию, являются низкие выносливость на изгиб и износостойкость.

#### 4.6.1 Анализ показателей выносливости на изгиб

При анализе дефектного состояния ножей к ЦС установлен механизм усталостного разрушения граней ножа. При этом учитывалось, что для стали число повторно-переменных нагружений условно принято равным 10 млн [98], а в нашем случае при работе каждый нож в смену воспринимает порядка 50 тыс. нагружений (см. таблицу 4), поэтому уже после 6–10 смен работы режущие грани начинают подвергаться усталостным разрушениям при изгибе (рисунок 54).

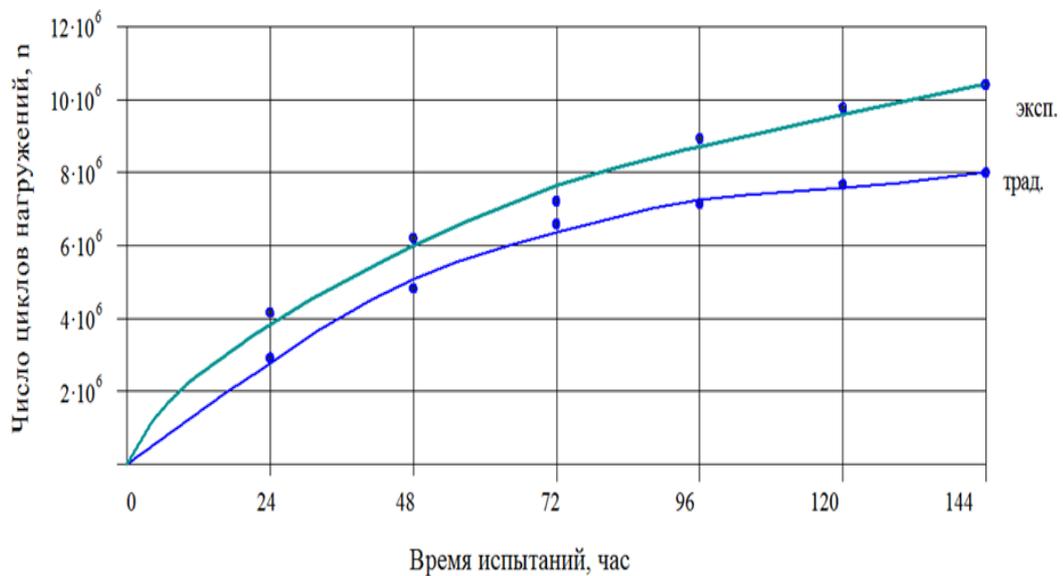


Рисунок 54 – Выносливость на изгиб режущих граней ножей

Картина изменения предела выносливости на изгиб у конструктивно и технологически усовершенствованных ножей при симметричном цикле нагружений схожа с серийным ножом, только уже после 72 ч испытаний выносливость увеличивается менее интенсивно. После 144 ч испытаний, что составляет 6 смен непрерывной работы, наблюдаются разрушения режущих 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 (приложение Ж).

#### 4.6.2 Анализ показателей износостойкости

Показатель износостойкости, характеризующий сопротивление изнашиванию режущих кромок ножа для измельчения сахарной свеклы, основан на гидроабразивном изнашивании, средой для которого являются parenхимная ткань свеклы, минеральные включения и свекловичный сок.

В нашем случае оценка износостойкости позволяет судить о безотказности, так как каждое сверхдопустимое затупление режущих кромок граней ведет к изменению параметров стружки. Следовательно, по частоте появляющегося отказа он характеризуется как периодический, оцениваемый качеством измельченной стружки. Отказ устраняют путем демонтажа ножей и перезаточек режущих кромок. Таким образом, чем ниже показатель износостойкости, тем больше перезаточек необходимо произвести для устранения отказов и тем быстрее нож достигнет своего предельного состояния по параметру допустимой длины граней, характеризующему показатель долговечности.

Износостойкость режущих кромок косвенно характеризует также ремонтпригодность ножей по количественному показателю вероятности среднего времени восстановления отказов: чем больше перезаточек, тем больше времени, необходимо для их осуществления.

В соответствии с графиком, представленным на рисунке 55, износостойкость ножей характеризуется параболической зависимостью процесса изнашивания по времени.

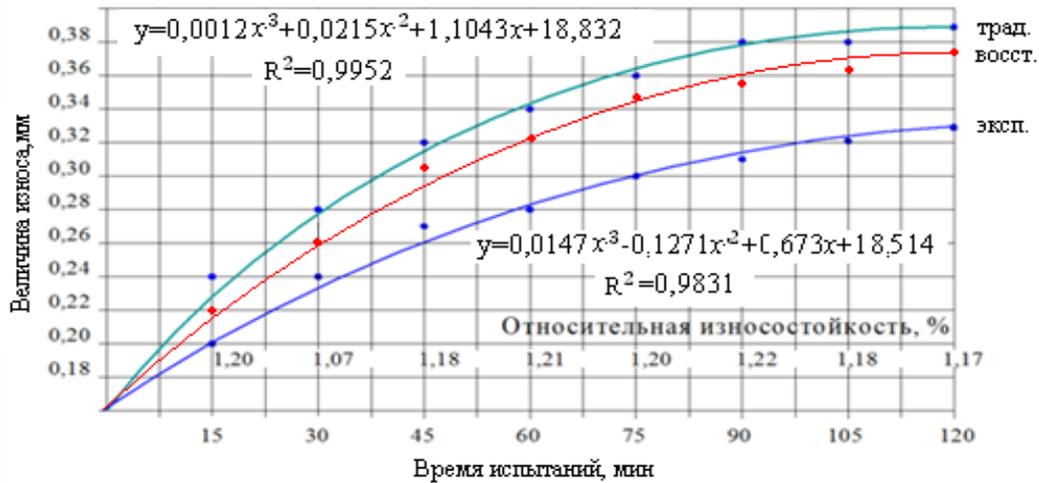


Рисунок 55 – Износостойкость режущих кромок ножей

Показатели кривых, характеризующих износостойкость серийного и экспериментального ножей в начальный момент эксперимента, приблизительно сходны. Это объясняется небольшой толщиной режущих граней (около 1,0 мм) и, соответственно, полной их прокаливаемостью по глубине слоя, что обеспечивает достаточно высокую стабильность микротвердости (см. рисунок 50). Затем интенсивность изнашивания возрастает, что согласуется с теорией изнашивания, по которой величина износа при прочих равных условиях прямо пропорциональна пути трения:

$$\frac{dU}{dt} = S. \quad (61)$$

Экспериментальными исследованиями установлена сравнительная характеристика процесса изнашивания. На начальный фиксируемый период времени, составляющий 15 мин, превышение величины износа от режущей кромки по длине грани у серийного ножа составило 3,4 мм. Износостойкость граней экспериментального упрочненного ножа возрастает на 17 %. В последующем повышение износостойкости граней экспериментального ножа характеризуется линейной зависимостью, наблюдается стабильность показателей со средней относительной износостойкостью, составляющей 1,2 (приложение К).

Увеличение износостойкости экспериментальных ножей обосновывается несколькими факторами, связанными в первую очередь с упрочнением металла граней пластическим деформированием и изменениями структурного и напряженно-деформированного состояния, заменой марки стали для изготовления ножей – во вторую.

Исходя из данных графиков (см. рисунок 55), повышение износостойкости режущих кромок ножей более чем в 2 раза снизит отказы, устраняемые перезаточкой.

#### **4.6.3 Анализ показателей производственных испытаний**

В задачи эксплуатационных испытаний, проведенных в производственных условиях ОАО «Балашовский сахарный комбинат», входили:

- проверка частоты перезаточек режущих кромок;
- проверка дефектовочных признаков при выбраковке ножей;
- длина свекловичной стружки;
- проницаемость свекловичной стружки.

Качество технологической операции измельчения сахарной свеклы характеризуется длиной свекловичной стружки, обеспечиваемой только техническим состоянием ножа в исследуемой продолжительности резки.

Каждое сверхдопустимое затупление режущей кромки ножа следует считать отказом, возникающим постепенно, в течение длительного периода времени по причине протекающего процесса изнашивания. Вследствие отказа возникают проблемы, связанные с изменением характера измельчения свеклы, ухудшением качества стружки и, как итог, недополучением сахарозы.

Производственными исследованиями процесса измельчения установлена зависимость выхода качественной стружки от технического состояния ножа. Ножи, изготовленные по традиционной технологии (рисунок 56), изнашиваются интенсивно и фактически после каждой смены требуют перезаточки (приложение Л).

Показатели изнашивания восстановленных ножей, изготовленных из стали У7 и У8, практически совпадают с показателями серийных ножей.

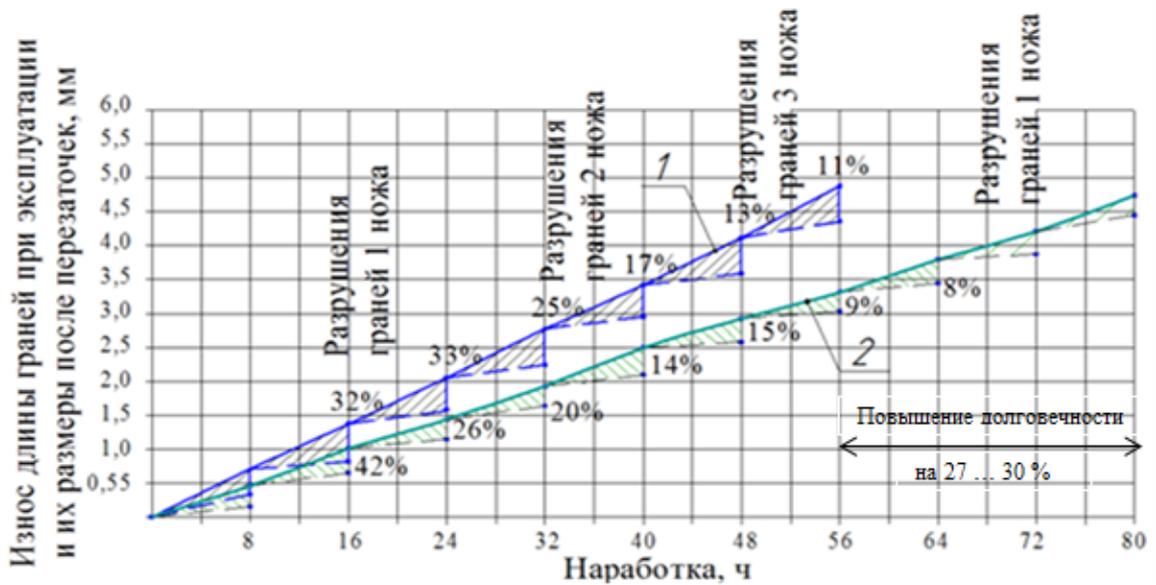


Рисунок 56 – График зависимости износного состояния длины граней на показатели безотказности и долговечности в эксплуатационных условиях:

1 – традиционный нож; 2 – экспериментальный нож.

В соответствии с принятой методикой производственных испытаний в качестве основных условий установлен регламент проведения ремонтно-обслуживающих работ, принятый на ОАО «Балашовский сахарный комбинат» для центробежной свеклорезной установки (см. таблицу 6). При этом перезаточки режущих кромок ножей осуществляли по окончании каждой смены, что характеризуется оценочными показателями наработки на отказ и до достижения предельной величины износа, определяющего долговечность ножа.

Микрометражными исследованиями (см. рисунок 56, график 1) установлено, что величина износа длины граней у серийных ножей составляет 0,2 мм. При этом полностью изнашиваются режущие кромки граней, два угла заточки которых на торце (рисунок 57) обеспечивают качество стружки.

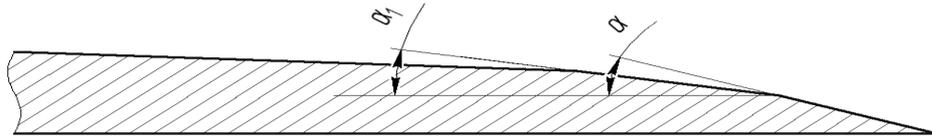


Рисунок 57 – Форма заточки режущих кромок граней ножа

При износе и потере установленных углов  $\alpha = 75...80^\circ$  и  $\alpha_1 = 50...60^\circ$  процесс резания свеклы сопровождается деформированием стружки, что резко ухудшает выход из нее сахарозы. По этой причине дальнейшая эксплуатация ножей без перезаточки нецелесообразна. На этом основании регистрируют отказ ножа, обуславливающий показатель наработки на отказ в течение одной смены (8 ч).

Неравномерный износ длины граней по ширине ножа ведет к необходимости съема 0,5 мм металла для выравнивания торцов до заточки режущих кромок. При устранении первого отказа длина граней ножа укорачивается на 0,7 мм. Для обеспечения одинакового вылета кромок ножей в сходном окне неподвижного цилиндра в каждую рамку свеклорезной установки монтируют два ножа с одинаковыми длинами граней. На этом основании оба ножа растачиваются по максимальному износу граней пары.

При продолжении эксплуатации ножей наблюдается сходная тенденция процесса изнашивания. Интенсивность укорачивания длин граней в период наработки 24 ч превысила 30 %. После четырех смен работы интенсивность изнашивания начала снижаться, что, по нашему мнению, связано с изменением условий процесса измельчения, так как при уменьшении длины граней их выносливость на изгиб повышается и уменьшается величина, приходящаяся на выкрашивание режущих кромок. Данное обстоятельство подтверждает теоретические предпосылки, приведенные в разделах 2.2 и 2.3.

После 56 ч наработки, при устранении семи отказов, ножи, изготовленные по традиционной технологии, достигают предельного состояния по выбраковочному признаку – длине граней, что характеризует их долговечность.

Механизм изнашивания экспериментальных ножей не имеет принципиальных отличий от серийных (см. рисунок 56, график 2). Он отличается лишь величинами износов и припусков, приходящихся на заточку режущих кромок.

Износ длины грани упрочненного экспериментального ножа после 8 ч наработки составляет 0,1 мм. Это в два раза меньше износа серийного ножа. Состояние ширины граней ножа в целом таково, что на перезаточку необходим припуск 0,3 мм. В этой связи при устранении первого отказа длина грани экспериментального ножа уменьшается в совокупности на 0,4 мм. Данное обстоятельство свидетельствует о состоявшемся процессе упрочнения граней пластическим деформированием.

Несколько повышенная интенсивность изнашивания в начальный период времени эксплуатации объясняется, как и для случая с серийными ножами, сложностью измельчения свеклы в начальный период, более тонкому и, следовательно, частому проходу корнеплода по режущей кромке. Однако даже в этот период времени износостойкость экспериментальных ножей повышается на 30 %. В последующем уменьшение величины износа и постоянный припуск на перезаточку при ежесменных устранениях отказов обеспечивают наличие металла по длине граней. Это увеличивает время до достижения предельного состояния длин граней на 24 ч, что составляет три смены работы центробежной свеклорезной установки в производственных условиях. Показатель долговечности экспериментальных ножей достигает 88 ч. Данные экспериментального анализа износного состояния граней режущих кромок ножей подтверждают с высокой степенью сходимости материалы лабораторных исследований, приведенные в подразделе 4.6.2 и на рисунке 55.

С целью повышения предела выносливости на изгиб граней ножей в подразделе 2.6.1 было предложено конструктивное усовершенствование (см. рисунок 36), состоящее в утолщении дна грани на угол  $\beta_2$ , составляющий  $2...3^\circ$  от режущей кромки к основанию. По результатам эксплуатационных испытаний из восьми испытуемых ножей было выбраковано по причине разрушений и поломок граней:

– серийных ножей: после 2-й смены – 1; после 4-й – 1 и после 6-й смены – 1 нож, что составило 25 %;

– экспериментальных ножей: после 8-й смены – 1 нож, что составило 8 %.

За 56-часовой цикл наработки из 12 испытуемых разрушению подверглись 25 % серийных ножей и 8 % экспериментальных, что свидетельствует о повышении показателя предела выносливости на изгиб за счет упрочнения стенок граней и утолщения их дна и вершины.

Повышение показателя предела выносливости на изгиб конструктивно усовершенствованных граней ножей и их упрочнение пластическим деформированием свидетельствуют о достижении поставленной цели.

Исходя из рассмотренных в подразделе 1.2 видов, последствий и критичности отказов, в работе анализу были подвергнуты процесс измельчения и его качество, регламентируемые наработкой на отказ и долговечностью ножей по качественному признаку получаемой свекловичной стружки.

Качество стружки характеризуется ее длиной в 100 г навески и проницаемостью, количеством растворенной в свекловичной стружке сахарозы (рисунок 58).

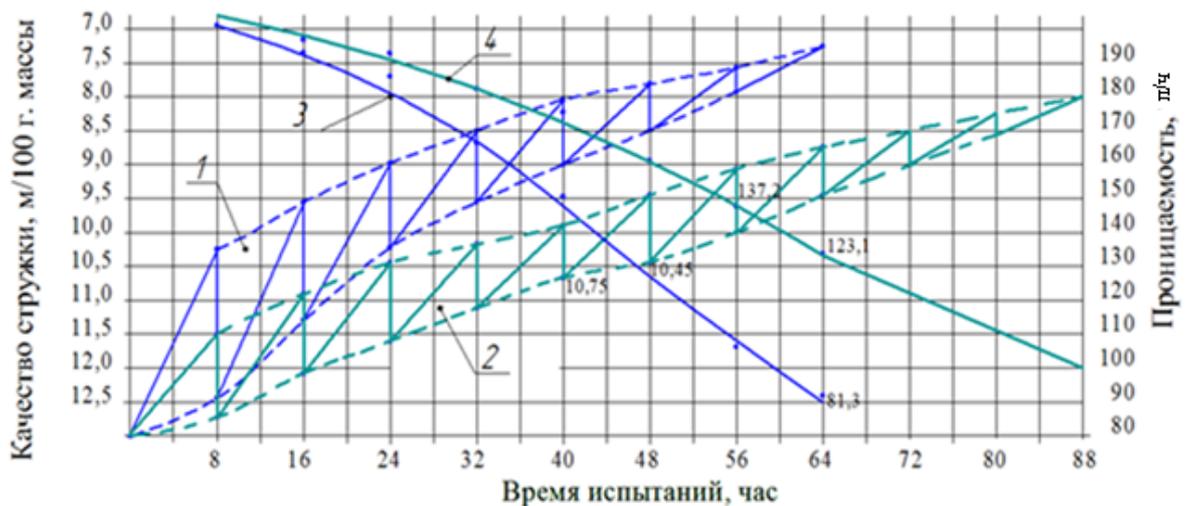


Рисунок 58 – Изменение длины и проницаемости свекловичной стружки:

- 1, 3 – длина и проницаемость стружки от традиционного ножа, соответственно;  
2, 4 – длина и проницаемость стружки от экспериментального ножа, соответственно

В начальный период измельчения свеклы длина стружки находится в интервале 14,0...14,5 м. В последующем, по мере затупления и износа режущих кромок граней ножа, этот показатель ухудшается, и уже в конце первой смены длина стружки от серийных ножей уменьшается на 27 %. После устранения первого отказа путем торцевания и заточки режущих граней в начальный период второй смены длина стружки увеличивается с 10,24 до 12,41 м (см. рисунок 58, график 1). Это обеспечивает 190,5%-ю проницаемость, что вполне удовлетворительно для производства (см. рисунок 58, график 3).

У экспериментальных ножей (см. рисунок 58, график 2) длина стружки уменьшается после первой смены на 18 %, что объясняется повышенной стойкостью упрочненных режущих кромок к затуплению и износу. Свекла измельчается более качественно, без деформаций границ срезов. После заточки длина стружки увеличивается с 11,51 до 12,78 м, что обеспечивает более высокую проницаемость, составляющую 191,5 % (см. рисунок 58, график 4). Установлено, что по мере продолжения эксплуатации характер уменьшения длины и проницаемости стружки взаимосвязан с посменным износным состоянием граней (см. рисунок 58). После каждой последующей смены в связи с износом показатель длины стружки падает на 7–8 %, картина анализируемого параметра после устранения отказов перезаточками идентична.

После шестой смены длина стружки укорачивается до предельного состояния 8–7 м с падением проницаемости до 90–80 %, что на основании графиков, представленных на рисунках 4 и 6, обуславливает показатель долговечности традиционных ножей 48–56 ч наработки.

Уменьшение длины и проницаемости стружки, полученной при измельчении свеклы экспериментальными упрочненными ножами, менее интенсивно. Длина достигает предельного состояния 8 м к 11-й смене. Проницаемость при этом составляет 95 %.

Согласно графикам 1 и 2 (см. рисунок 58), процесс упрочнения граней экспериментальных ножей наглядно иллюстрируется и полями рассеяния величин длины стружки после наступления отказа и его устранения.

Таким образом, упрочнение граней ножей пластической деформацией позволяет повысить долговечность ножей на 40–45 % и обеспечить при этом допустимые показатели качества стружки.

#### 4.7 Критериальность и достоверность результатов исследований

Для определения закономерностей износа ножей, изготовленных по традиционной (Т) и экспериментальной (Э) технологиям, анализу были подвергнуты данные реального износного состояния длины граней после восьмичасовых циклов исследования до их ежесменной заточки (рисунок 59, приложение М).

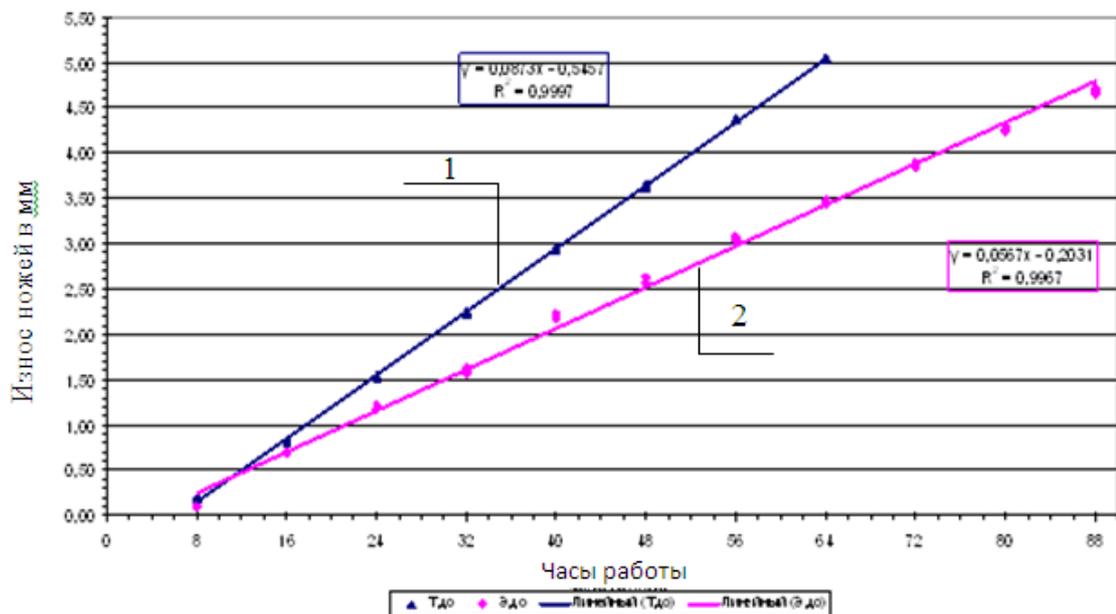


Рисунок 59 – Изменение величины износа ножей от времени работы: 1 – традиционный нож; 2 – экспериментальный нож

##### 4.7.1 Анализ износного состояния граней

Повышение износостойкости экспериментальных ножей характеризуется показателем коэффициента 0,0567, что позволяет судить об увеличении их износостойкости на 34 % по сравнению с серийными ножами.

В таблицах 8, 9 представлены статистические оценки коэффициентов уравнений регрессии с 95%-м и 99%-м доверительными интервалами.

Таблица 8 – Критериальность оценки и достоверность результатов износостойкости серийных ножей

Переменная	Коэффициент	Стандартная ошибка	<i>t</i> -критерий	<i>P</i> -критерий	Доверительный интервал			
					нижний 95%-й	верхний 95%-й	нижний 99%-й	верхний 99%-й
<i>Y</i>	–0,5457	0,0088	–61,7824	1,16E-46	–0,5635	–0,5280	–0,5694	–0,5220
<i>X</i>	0,0873	0,0002	372,9225	3,08E-83	0,0868	0,0878	0,0867	0,0879

Таблица 9 – Критериальность оценки и достоверность результатов износостойкости экспериментальных ножей

Переменная	Коэффициент	Стандартная ошибка	<i>t</i> -критерий	<i>P</i> -критерий	Доверительный интервал			
					нижний 95%-й	верхний 95%-й	нижний 99%-й	верхний 99%-й
<i>Y</i>	–0,2031	0,0192	–10,5685	5,68E-17	–0,2413	–0,1648	–0,2537	–0,1524
<i>X</i>	0,0567	0,0004	156,3133	2,8E-103	0,0560	0,0574	0,0557	0,0577

Выборочная средняя величина износа по сменам работы для серийных ножей составляет 0,187 мм, а для экспериментальных – 0,150 мм. Для каждой из выборочных средних построена доверительная вероятность  $\beta = 0,95$ . Вследствие того, что в этой вероятности доверительные интервалы не пересекаются, можно утверждать, что в принятом доверительном интервале износостойкость экспериментальных ножей гарантированно выше, чем серийных.

Для принятого  $\beta = 0,95$  уровень значимости составляет  $\alpha = 1 - 0,95 = 0,05$ . Согласно результатам расчетов по уравнениям регрессии, доверительные интервалы для серийных ножей (0,176; 0,197), а для экспериментальных – (0,1335; 0,1669).

Для конкретизации достоверности процесса упрочнения граней ножа при их восстановлении и изготовлении по предложенной технологии исследовали 99%-ю доверительную вероятность. В этом случае уровень значимости [122]  $\alpha = 1 - 0,99 = 0,01$  и, соответственно, доверительные интервалы находятся в пределах: для серийных ножей (0,1725; 0,2005), а для

экспериментальных – (0,128; 0,1724). Доверительные интервалы не пересекаются, и это дает возможность утверждать наличие процесса упрочнения и повышения износостойкости граней ножа.

#### 4.7.2 Анализ зависимости длины и проницаемости стружки от величины износа длины граней

Гипотетически, исходя из данных, представленных на рисунке 59, можно предположить, что вид линейных регрессий должен обеспечить увеличение длины стружки при повышении износостойкости и режущей способности режущих кромок граней ножа. На рисунке 60 представлена диаграмма зависимости длины стружки и ее проницаемости от показателей посменного износа состояния граней серийных и экспериментальных ножей. По программе «Регрессия» разработаны таблицы, содержащие аналитические критериальные показатели зависимости качества стружки от износостойкости граней ножа.

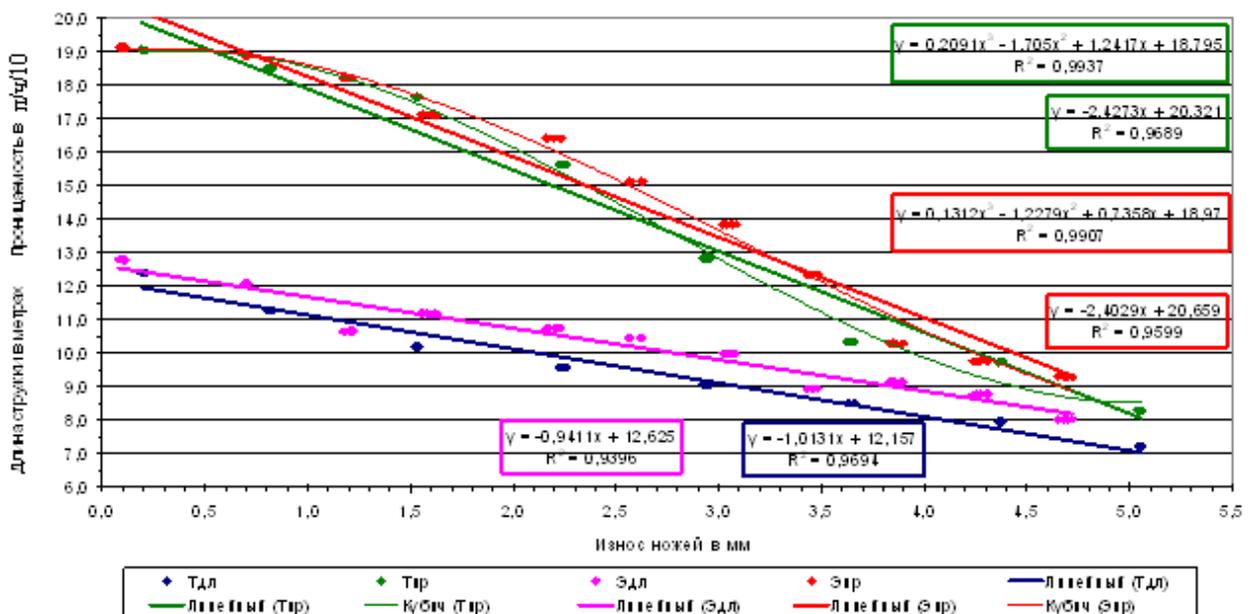


Рисунок 60 – Зависимость длины стружки и проницаемости от величины износа ножей

Анализ экспериментальных данных показывает, что линейные регрессии зависимости длины стружки от износостойкости граней с 97%-й достоверностью подтверждают посменное удлинение стружки на 18–20 %. Это объясняется следующим.

Во-первых, за счет повышения износостойкости граней ножа его режущие кромки сохраняют более длительно свои повышенные режущие свойства. В отличие от граней серийных ножей, их сравнительная наработка на отказ наступает позже установленного срока устранения отказа. Это обстоятельство дает возможность при одной и той же наработке получать повышенную на 18–20 % длину стружки.

Во-вторых, повышенная износостойкость материала граней экспериментальных ножей обеспечивает наличие остаточного ресурса, и это при ежесменных перезаточках (см. рисунок 56) позволяет на 30 % снизить величину съема металла по длине грани. Появляется возможность при одной и той же наработке получать стабильную толщину стружки, что в 100 г навески обеспечивает большую ее длину.

Результаты расчетов коэффициентов регрессионных уравнений (см. рисунок 60) сведены в таблицы 10 и 11.

Таблица 10 – Критериальность оценки и достоверность зависимости длины стружки от износа серийного ножа

Переменная	Коэффициент	Стандартная ошибка	t-критерий	P-критерий	Доверительный интервал			
					нижний 95%-й	верхний 95%-й	нижний 99%-й	верхний 99%-й
Y	12,1572	0,0743	163,6701	1,92E-66	12,0077	12,3066	11,9577	12,3566
X	-1,0131	0,0262	-38,5952	3,02E-37	-1,0659	-0,9603	-1,0836	-0,9426

Таблица 11 – Критериальность оценки и достоверность зависимости длины стружки от износа экспериментального ножа

Переменная	Коэффициент	Стандартная ошибка	<i>t</i> -критерий	<i>P</i> -критерий	Доверительный интервал			
					нижний 95%-й	верхний 95%-й	нижний 99%-й	верхний 99%-й
<i>Y</i>	12,6253	0,0745	169,4095	3,9E-106	12,4771	12,7736	12,4288	12,8219
<i>X</i>	-0,9411	0,02634	-35,7047	9,77E-52	-0,99356	-0,8887	-1,0106	-0,8716

Анализ показателей зависимости проницаемости стружки от износостойкости граней ножа (см. рисунок 60) также подтверждает зависимость повышения проницаемости стружки от технического состояния ножа. Повышение износостойкости ножей влечет за собой и повышение проницаемости стружки.

Графики линейных уравнений регрессии для серийных ножей являются убывающими, что характеризует изменения проницаемости. Для определения их значимости для каждой исследуемой точки графика определены 95%-й и 99%-й доверительные интервалы. Исходя из того, что они имеют различные *t*-критерии распределения Стьюдента, они описываются разными радиусами и уравнениями регрессии:

для серийных ножей:

$$t(0,05; 8-2) = 2,447; \quad t(0,01; 8-2) = 3,707; \quad y = 217,136 - 2,141x; \quad (62)$$

для экспериментальных ножей:

$$t(0,05; 11-2) = 2,262; \quad t(0,01; 11-2) = 3,250; \quad y = 212,211 - 3,381x. \quad (63)$$

Расчет доверительной вероятности зависимости повышения показателя проницаемости стружки представлен в таблице 12, где  $T_n$ ,  $\mathcal{E}_n$  – проницаемость стружки, %;  $T_p$ ,  $\mathcal{E}_p$  – радиусы доверительных интервалов в точках;  $T_n$ ,  $\mathcal{E}_n$  – нижние границы доверительных интервалов, %;  $T_b$ ,  $\mathcal{E}_b$  –

верхние границы доверительных интервалов, %;  $\Theta - T$  – значения разности доверительных интервалов, %;  $T_y$ ,  $\Theta_y$  – проникаемость, рассчитанная по регрессионному уравнению, %.

Обобщение показателей проникаемости стружки от серийных и экспериментальных ножей представлено в графе разности верхней и нижней границ доверительного интервала  $\Theta - T$  (рисунок 61). Нарботка на отказ серийных ножей составляет 32 ч, у экспериментальных она увеличивается до 56–72 ч.

Таблица 12 – Доверительные интервалы зависимости проникаемости стружки от износостойкости граней

Доверительный интервал $\beta$	Интервалы времени работы ножей $x$ , ч										
	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88
$T_y$	200,0	182,9	165,8	148,6	131,5	114,4	97,2	80,1	63,0	45,9	28,7
$T_{н95}$	13,1	10,6	8,06	7,3	7,3	8,6	10,6	13,1	15,8	18,6	21,5
$T_{в95}$	186,9	172,3	157,2	141,3	124,2	105,8	86,7	67,1	47,2	27,3	7,2
$T_{р95}$	21,1	193,5	174,3	155,9	138,8	122,9	107,8	93,2	78,8	64,5	50,3
$T_{н95}$	19,8	16,0	13,0	11,1	11,1	13,0	16,0	19,8	23,9	28,2	32,6
$T_{в95}$	180,2	166,8	152,8	137,5	120,4	101,4	81,2	60,3	39,1	17,7	-3,9
$T_{в95}$	219,8	198,9	178,7	159,7	142,6	127,3	113,3	99,9	86,9	74,0	61,3
$\Theta_y$	201,2	190,1	179,1	168,0	157,0	145,9	134,8	123,8	112,7	101,7	90,6
$\Theta_{р95}$	7,7	6,6	5,7	4,9	4,3	4,1	4,3	4,9	5,7	6,6	7,7
$\Theta_{н95}$	193,5	183,5	173,4	163,1	152,6	141,8	130,5	118,9	107,1	95,1	83,0
$\Theta_{в95}$	208,8	196,7	184,7	172,9	161,3	150,0	139,2	128,7	118,4	108,3	98,3
$\Theta_{р95}$	11,0	9,5	8,1	7,0	6,2	5,9	6,2	7,0	8,1	9,5	11,07
$\Theta_{н95}$	190,1	180,6	170,9	161,0	150,8	140,0	128,7	116,8	104,6	92,2	9,6
$\Theta_{н95}$	212,2	199,6	187,2	175,0	163,1	151,8	141,0	130,8	120,9	111,2	101,7
$T_{в99}$	219,8	198,9	178,7	159,7	142,6	127,3	113,3	99,9	86,9	80,0	80,0
$T_{в95}$	213,1	193,5	174,3	155,9	138,8	122,9	107,8	93,2	80,0	80,0	80,0
$\Theta - T_{99}$	-29,7	-18,3	-7,8	1,3	8,2	12,7	15,4	16,9	17,7	12,2	-0,4
$\Theta - T_{95}$	-19,6	-10,0	-0,9	7,2	13,8	18,9	22,7	25,8	27,1	15,1	3,0

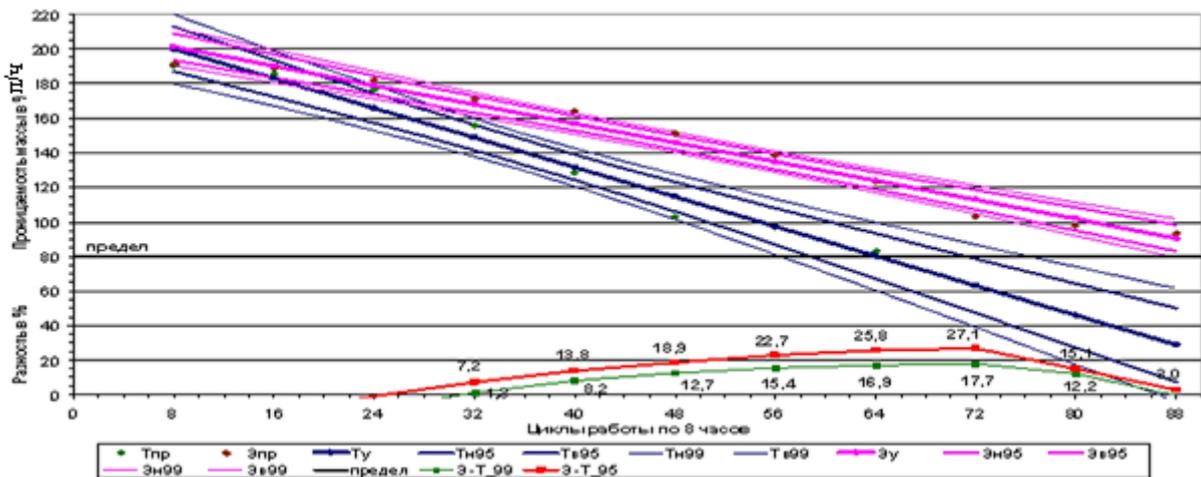


Рисунок 61 – Закономерности повышения проницаемости стружки в зависимости от повышения износостойкости граней ножа

#### 4.8 Технологический процесс восстановления и упрочнения ножей к ЦС

Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлена целесообразность повышения долговечности ножей к ЦС. Это позволит повысить качество измельчения свеклы, ресурсосберегающие показатели сахарного производства за счет повышения эффективности выхода свекловичного сока и снизить эксплуатационные расходы в связи с повышением среднего ресурса до списания ножей и уменьшением количества перезаточек.

Заготовительная операция – вырубка из листа толщиной 5 мм заготовки с установленными размерами под последующую операцию пластической деформации. Для этой цели используется вырубной штамп, устанавливаемый на кривошипный пресс К 2130 С, где формируются размеры профиля ножа и установочные пазы.

Технологические процессы восстановления и упрочнения ножей представлены на рисунке 62.

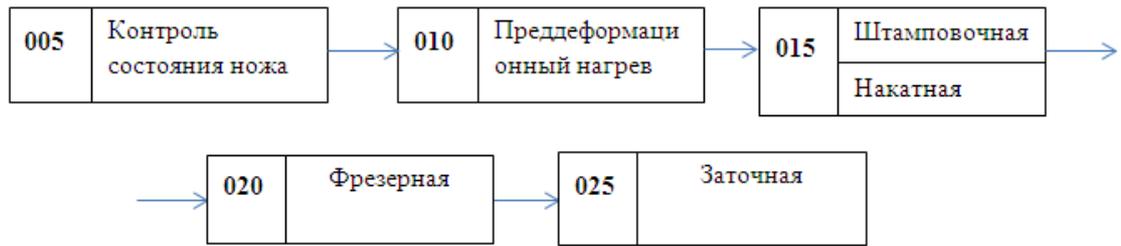
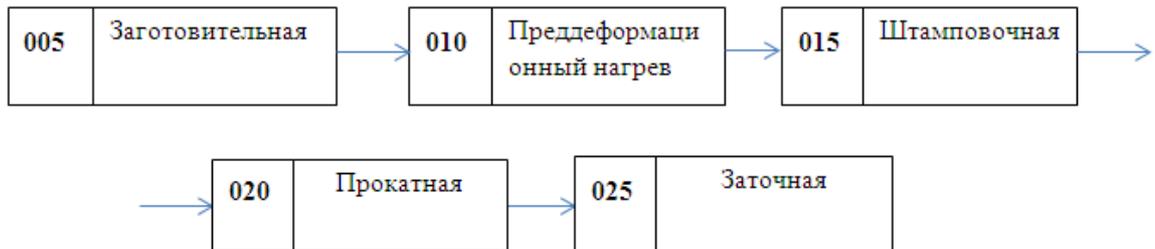
*a**б*

Рисунок 62 – Технологические процессы изготовления ножей:

*a* – серийных; *б* – экспериментальных

Термическая операция подразумевает нагрев заготовки до температуры 1050 °С. Ее осуществляют в цеховой установке ТВЧ.

Штамповочная операция – высадка заготовки с формированием привалочной и режущей плоскостей с гранями ромбовидной формы. Осуществляется в специальной штамповой оснастке (см. рисунки 31 и 32).

Фрезерная операция представляет собой финишную двустороннюю обработку режущих граней многопозиционной режущей фрезерной головкой (см. рисунок 33).

Заточная операция – заточка режущих граней. Ее осуществляют на специальном заводском оборудовании.

## Выводы

1. Исследованы и обоснованы оптимальные технологические режимы, обеспечивающие качественное формообразование ножей к центробежным свеклорезным установкам:

- температура преддеформационного нагрева 1000...1050 °С;
- усилие деформации – 950 кН;
- скорость деформирования – 0,00085–0,00075 м/с.

2. Микрометражными исследованиями подтверждена сходимость теоретических предпосылок формообразования режущих ромбовидных граней ножей, обеспечивающего получение стабильных размеров и припусков на проведение финишных операций механической обработки.

3. Исследованиями микроструктурного и напряженного состояния ножей, изготовленных высадкой в штамповой оснастке, установлен механизм упрочнения режущих граней, основанный на повышении дисперсности зерен металла, их волокнистой ориентированности по линиям сдвига, повышении прочностных показателей на 27 %, остаточных напряжений 1-го рода в 5 раз и изменении дислокационного состояния субмикроструктуры в 1,4 раза.

4. Установлено, что принятые конструктивно-технологические решения позволяют повысить основные ресурсные показатели, характеризующие долговечность и безотказность ножей:

- выносливость на изгиб с циклом нагружений для серийных ножей  $8 \cdot 10^6$ , экспериментальных –  $11 \cdot 10^6$ ;
- повышение износостойкости на 30 % и сокращение в 3 раза отказов, устраняемых перезаточкой режущих кромок.

5. Проведенными оценками критериальности установлена с доверительными интервалом 95–99 % сходимость данных теоретического анализа и результатов экспериментальных испытаний зависимости качественных показателей стружки от износостойкости и выносливости на изгиб граней ножа:

- уменьшение длины стружки в 100 г навески и ее проницаемости при использовании традиционных ножей наблюдается в односменном интервале от 14 м в начале и до 8 м к концу смены. Это ведет к недобору 28–30 % сахарозы и необходимости ежесменного восстановления режущей кромки ножа с укорачиванием длины грани на 0,7 мм;

– повышение износостойкости и выносливости на изгиб экспериментальных ножей на 25–30 % позволяет увеличить длину стружки к концу смены до 1,5 м (на 15–17 %), тем самым уменьшить потери сахарозы на 20–25 %. Наряду с этим к концу смены у них имеется остаточный ресурс, уменьшающий до 0,4 мм съем металла при заточке режущей кромки. Это обеспечивает повышение показателя наработки на отказ на 28–30 % и среднего ресурса на 40 %. Предельное состояние за счет снижения интенсивности износов достигается через 10 смен работы, в отличие от наработки серийных ножей, составляющей 6 смен.

## 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

### РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эффективность предлагаемого технологического процесса с новыми конструктивно-технологическими решениями, степень их разработанности и производственной востребованности оценивали экономическими и производственными показателями.

Оценку экономической эффективности осуществляли в соответствии с методическими рекомендациями [149–154].

Исходные данные для расчетов:

- материал ножа – 40X13;
- стоимость стали 40X13 – 80 руб./кг;
- стоимость ножа – 289 руб.;
- масса заготовки экспериментального ножа – 0,6 кг;
- годовая производственная программа – 30000;
- материал серийного ножа – У7;
- стоимость стали У7 – 60 руб./кг.
- масса заготовки серийного ножа – 1,45;

Затраты  $C_n$ , связанные с изготовлением ножа к центробежным свеклорезным установкам, определяли по формуле:

$$C_n = Z_{пр} + C_o + A_o + P_n + Z_{ро}, \quad (64)$$

где  $Z_{пр}$  – заработная плата производственных рабочих, руб.;

$C_o$  – стоимость основных материалов, при массе заготовки 0,6 кг  $C_o = 48$  руб.;

$A_o$  – основные амортизационные отчисления на оборудование, руб.;

$P_n$  – расходы на инструмент, руб.;

$Z_{ро}$  – затраты на ТО, ТР, КР, руб.

Заработная плата производственных рабочих складывается из основной  $Z_o$ , дополнительной  $Z_d$  заработной платы и отчислений на социальное страхование  $Z_{сс}$ :

$$Z_{пр} = Z_o + Z_d + Z_{сс}. \quad (65)$$

Основную заработную плату определяли исходя из штучного времени на выполнение операций  $T_{шт}$ , часовой тарифной ставки рабочего  $T_{час}$  и коэффициента  $K_d$ , учитывающего надбавки к заработной плате:

$$Z_o = \sum_{i=1}^n \left( T_{шт} + \frac{T_{час}}{60} \right) K_d. \quad (66)$$

Коэффициент, учитывающий надбавки к заработной плате, принимался  $K_d = 1,3$ . Дополнительная зарплата учитывает дополнительные доплаты  $K_1 = 0,2$ :

$$Z_d = Z_o K_1. \quad (67)$$

Отчисления по социальному страхованию  $Z_{cc}$ :

$$Z_{cc} = (Z_o + Z_d) K_2, \quad (68)$$

где  $K_2$  – коэффициент отчислений по соцстраху,  $K_2 = 0,41$ .

Результаты расчетов по определению величины основной заработной платы приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Затраты на заработную плату

№	Наименование операции	Норма времени, мин	Часовая тарифная ставка, руб.	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.	Отчисления на соцстрах, руб.
005	Заготовительная	5	45,5	2,27	0,454	
010	Термическая	25	45,5	11,37	2,274	
015	Штамповочная	3	45,5	8,36	1,672	
020	Фрезерная	15	45,5	6,82	1,364	
025	Термическая	18	45,5	8,19	1,638	
030	Заточная	5	45,5	2,27	0,454	
035	Контрольная	2	45,5	0,91	1,182	16,33
	Итого	70		33,19 6,64	6,638	56,16

Таким образом, затраты на заработную плату при изготовлении одного ножа составят 56,16 руб.

Расходы на материал определяли исходя из массы одной заготовки и

стоимости материала. Размеры заготовки для изготовления серийных ножей  $17,0 \times 9,0 \times 1,2 = 183,6 \text{ см}^3$ , размеры заготовки для экспериментального ножа  $17,0 \times 9,0 \times 0,5 = 76,5 \text{ см}^3$ .

Масса заготовок серийного и экспериментального ножей соответственно 1450,44 и 604,35 г. Это обеспечивает более чем двукратную экономию металла. Стоимость стали 40X13 составляет 80 руб./кг, а стали У7 – 60 руб./кг, тогда стоимость материала серийной заготовки 87,02 руб., а экспериментальной – 48,35 руб.

Амортизационные отчисления  $A_0 = 1,64$  руб.

Расходы на инструмент:

$$P_{\text{и}} = C_{\text{и}} \Pi'' (N \cdot 100), \quad (69)$$

где  $C_{\text{и}}$  – стоимость инструмента, руб., устанавливается равной 15 %;

$\Pi''$  – норма амортизационных отчислений, %,  $\Pi'' = 12$  %.

$$P_{\text{и}} = 36770 \cdot 12(3000 \cdot 100) = 1,47 \text{ руб.}$$

Затраты на капитальный, текущий ремонт и техническое обслуживание:

$$Z_{\text{рo}} = R + P_{\text{э}} + A_{\text{оп}}, \quad (70)$$

где  $R$  – базовые затраты на ремонтно-обслуживающие работы, руб.;

$P_{\text{э}}$  – затраты на оплату электроэнергии, руб.;

$A_{\text{оп}}$  – амортизационные затраты на приспособления, руб.

Годовые затраты на ремонтно-обслуживающие мероприятия определяются из выражения:

$$R' = \frac{(B_{\text{об}} P \sum_{i=1}^n t_{\text{шт}})}{(\Phi_{\text{в}} K_{\text{затр}} \cdot 100 \cdot 60)}, \quad (71)$$

где  $P$  – норматив ремонтно-обслуживающих затрат, %,  $P = 12$  %;

$t_{\text{шт}}$  – штучное время  $i$ -й операции, мин (см. таблицу 13)

Амортизационные отчисления на оборудование определяются по формуле:

$$A_o = B_{об} П'' / (N \cdot 100), \quad (72)$$

где  $B_{об}$  – балансовая стоимость оборудования, руб.;

$П''$  – норма амортизационных отчислений, %;

$N$  – годовая программа ( $N = 30\,000$  шт.).

Для определения балансовой стоимости составлена таблица капитальных затрат на производство ножей (таблица 14).

Таблица 14 – Капитальные затраты на производство ножей

Наименование операции	Наименование оборудования	Оптовая цена, руб.	Количество оборудования, ед.	Мощность, кВт
Заготовительная	Пресс кривошипный К 2130 С	31000	1	2
Термическая	Установка ТВЧ цеховая	26000	1	10
Штамповочная	Пресс гидравлический	150000	1	7,5
Фрезерная	Штамповая оснастка	16000	1	10
Термическая	Печь электрическая	15000	1	15
Заточная	Станок заточной МЗ 37 Т			
Контрольная	Штангенциркуль, измерительные скобы	7500	2	–
Всего		245500		44,5

Годовой действительный фонд времени работы оборудования  $\Phi_d = 1581,3$  ч.

Коэффициент загрузки оборудования  $K_{затр} = 0,8$ .

$$R = (245500 \cdot 12 \cdot 70) / (1581,3 \cdot 0,8 \cdot 100 \cdot 600) = 2,72 \text{ руб.}$$

Затраты на электроэнергию определяются из соотношения расхода электроэнергии на тарифную ставку 1 кВт·ч при установленной мощности оборудования  $N$ :

$$P_{э} = \sum_{i=1}^n N t_{шт} = 44,5 \cdot 70 = 3115 \text{ руб.} \quad (73)$$

Амортизационные отчисления на приспособления:

$$A_{\text{оп}} = (C_{\text{пр}} P'') / (100 \cdot N_g), \quad (74)$$

где  $C_{\text{пр}}$  – стоимость приспособлений, руб.,  $C_{\text{пр}} = 26\,500$  руб.;

$P''$  – норма амортизации, %,  $P'' = 12\%$ ;

$N_g$  – количество изделий, обрабатываемых на данном приспособлении, шт.,  $N_g = 30\,000$  шт.

$$A_{\text{оп}} = (26500 \cdot 12) / (100 \cdot 30000) = 1,06 \text{ руб.}$$

Тогда затраты на ремонтно-обслуживающие мероприятия:

$$З_{\text{ро}} = 27,2 + 3,1 + 1,06 = 31,36 \text{ руб.}$$

Исходя из принятых решений, себестоимость изготовления ножа по исследуемой технологии:

$$C_{\text{н}} = 56,16 + 48,35 + 1,64 + 1,47 + 31,36 = 138,98 \text{ руб./шт.}$$

Годовой экономический эффект от внедрения разработанного технологического процесса рассчитывался по формуле:

$$\mathcal{E}_{\Gamma} = [Ц_{\text{с}} - (C_{\text{и}} + E_{\text{н}} K_{\text{в}} / N)] N, \quad (75)$$

где  $Ц_{\text{с}}$  – цена серийного ножа, руб.,  $Ц_{\text{с}} = 289$  руб.;

$C_{\text{и}}$  – себестоимость упрочнения ножа по разработанной технологии, руб.;

$E_{\text{н}}$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений,

$$E_{\text{н}} = 0,15;$$

$K_{\text{в}}$  – капитальные вложения, руб.;

$N$  – базовая производственная программа,  $N = 30\,000$  шт.

$$\mathcal{E}_{\Gamma} = \left[ 289 - \left( 138,98 \cdot 0,15 \frac{245500}{30000} \right) \right] \cdot 30000 = 3554100 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости затрат на внедрение новой технологии в производство:

$$T_0 = K_3 / \mathcal{E}_r, \quad (76)$$

где  $K_3$  – капитальные затраты, руб.

$$T_0 = 245500 / 3554100 = 0,1 \text{ года.}$$

### **Выводы**

Разработанные, изготовленные и испытанные устройства для формирования граней и режущей плоскости ножей к ЦС высадкой и накаткой, многопозиционные фрезерная и заточная оправки для их восстановления и упрочнения позволяют:

– повысить эффективность использования ЦС за счет устранения дефекта короблений геометрической формы граней и режущей плоскости ножа, составляющего 40–45 % от продефектованных изделий;

– получить годовой экономический эффект от внедрения результатов исследования в производство до 3,5 млн руб. при программе 30 тыс. шт. Он складывается из снижения себестоимости восстановления и упрочнения ножей и двукратной экономии расхода металла. Наряду с этим повышение показателей безотказности и долговечности на 30 % снизит расходы, связанные с устранением отказов и заменой ножей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе решена актуальная научно-практическая задача повышения долговечности ножей центробежных свеклорезок за счет совершенствования технологий восстановления и упрочнения граней, направленных 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 %) обеспечили 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**

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

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

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Population sewenbillion UN setsoutchallendes. – Режим доступа: <http://www.bbc.co.uk/news/world – 15459643> (англ.), BBC (26 окт 2011).
2. В России родился семимиллиардный житель Земли. – Режим доступа: <http://www.newsru.com/russia/31 окт 2011/7mlrdno.html> (рус.). NEWSru.com.
3. Экспертный портал Высшей школы экономики. – Режим доступа: <http://opes.ru/150872.html>.
4. Функциональные пищевые продукты. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/w/index.php>.
5. *Спиричев, В. Б.* Сколько витаминов человеку надо / В. П. Спиричев. – М., 2000. – 185 с.
6. Свеклорезные ножи и механизированная их обработка. – Режим доступа: <http://mppnik.ru/publ/krakhmalopatochnajaisakharnajapromyshlennost/sveklorozn yenozhiiemekhanizirovannajaikhobrabotka/13-1-0-965/13-1-0-966>.
7. *Рудик, Ф. Я.* К проблеме здорового питания / Ф. Я. Рудик, Л. З. Шильман // Вестник Саратовского госагроуниверситета. – 2001. – № 1. – С. 83–86.
8. Физико-механические свойства растений, почв и удобрений : методы исследований. – М. : Колос, 1970. – 243 с.
9. *Горячкин, В. П.* Теория ручных ножниц / В. П. Горячкин // Теория, конструкция и производство сельскохозяйственных машин. – М. ; Л. : Сельхозгиз, 1936. – С. 234–300.
10. *Горячкин, В. П.* Собрание сочинений / В. П. Горячкин ; под ред. Н. Д. Лучинского. – 2-е изд. – М. : Колос, 1968. – Т. 3. – С. 26–133.
11. *Бремер, Г. И.* Основы теории резания лезвием и расчет режущих машин животноводческих ферм / Г. И. Бремер // Сб. науч. тр. ВСХИЗО. – М., 1963. – Вып. 12. – С. 75.
12. *Желиговский, В. А.* Экспериментальная теория резания лезвием / В. А. Желиговский // Сб. науч. тр. МИМЭСХ. – М., 1940. – Вып. 9. – С. 27–36.

13. *Новиков, Г. И.* Исследование процесса резания корнеплодов / Г. И. Новиков // Сб. науч. тр. ВИМ. – М., 1952. – Т. 16. – С. 3–34.
14. *Резник, А. Е.* Теория резания лезвием / А. Е. Резник. – М. : Колос, 1975. – 236 с.
15. *Резник, А. Е.* Взаимодействие лезвия с материалом в процессе его резания и износ лезвия / А. Е. Резник // Повышение износостойкости и долговечности режущих элементов сельскохозяйственных машин / под ред. А. Е. Резника. – Минск, 1982. – С. 5–17.
16. *Босой, Е. С.* Режущие аппараты уборочных машин : теория и расчет / Е. С. Босой. – М. : Машиностроение, 1967. – 256 с.
17. *Резник, Г. И.* О терминологии теории резания лезвием / Г. И. Резник // Сб. науч. тр. ВСХИЗО. – М., 1962. – Вып. 12. – С. 7–12.
18. Сахарная свекла / Д. Шпаар [и др.]. – М. : Машиностроение, 1967. – 167 с.
19. *Сапронов, А. Р.* Технология сахарного производства / А. Р. Сапронов. – М. : Колос, 1999. – 495 с.
20. *Князев, В. А.* Приемка и хранение сахарной свеклы по прогрессивной технологии / В. А. Князев. – М. : Пищевая промышленность, 1984. – 200 с.
21. Best-sugar Technology / ed. R. A. McCinis. – 1982. – 855 p.
22. *Рудик, Ф. Я.* Особенности строения сахарной свеклы и ее измельчения в стружку / Ф. Я. Рудик, Л. Ю. Скрябина, А. П. Ковылин // Технология и продукты здорового питания : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2012. – С. 149–153.
23. ГОСТ 27.310–95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. – Минск : Стандартиформ, 1997. – 12 с.
24. Проектирование, конструирование и расчет техники пищевых технологий / под ред. В. А. Панфилова. – СПб. ; М. ; Краснодар : Лань, 2013. – 910 с.
25. *Азрилович, М. Я.* Технологическое оборудование свеклосахарных заводов / М. Я. Азрилович. – М. : Агропромиздат, 1986. – 320 с.

26. Валентас, К. Дж. Пищевая инженерия : справочник / К. Дж. Валентас ; под ред. К. Дж. Валентаса и А. Л. Ишевского. – СПб. : Профессия, 2004. – 848 с.

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

28. Рудик, Ф. Я. Технологические особенности обвалки сырья и направления повышения долговечности режущего инструмента / Ф. Я. Рудик, Л. Ю. Скрябина, А. П. Ковылин // Вестник Саратовского госагроуниверситета. – 2014. – № 7. – С. 37–41.

29. Белик, В. Г. Повышение технического уровня оборудования для сахарной промышленности : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Белик Владимир Григорьевич. – Киев, 1994. – 60 с.

30. Коломиец, В. В. К вопросу повышения качества стружки из корнеплода сахарной свеклы / В. В. Коломиец, И. А. Фабричникова // Инновационные пути развития АПК на современном этапе : материалы XVI Междунар. конф. – Белгород. 2012. – С. 29.

31. Статистический анализ износа ножей для дробления сахарной свеклы / Д. И. Черных [и др.] // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Белгород, 2009. – С. 12.

32. Анализ методов упрочнения ножей для переработки сахарной свеклы / Д. И. Черных [и др.] // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. – Харків, 2009. – Вип. 81. – С. 13–17.

33. Марочник сталей и сплавов / под ред. В. Г. Сорокина. – М. : Машиностроение, 1989. – 639 с.

34. Технология конструкционных материалов / под ред. А. М. Дальского. – М. : Машиностроение, 1990. – 352 с.

35. А. с. 94939 СССР, МПК С 13 В 1/08. Диффузионный нож для получения свекловичного сока / П. С. Сичевой. – № 3010/445224 ; заявл. 17.05.1952 ; опубл. 1953.

36. А. с. 96912 СССР, МПК С 13 В 1/08. Диффузионный нож для измельчения свекловичного сока / П. С. Сичевой. – № ЛП-118/446641 ; заявл. 13.04.1953; опубл. БИ № 1,1954.

37. Пат. 2053302 Российская Федерация, МПК С 13 С 1/08. Свеклорезный нож / Дапшев М. И., Дапшева М. А. ; заявители и патентообладатели Дапшев М. И., Дапшева М. А. – № 94007840/13 ; заявл. 01.03.1994 ; опубл. 27.01.1996.

38. А. с. 94007840 Российская Федерация, МПК С 13 С 1/08. Свеклорезный нож / Дапшев М. И., Дапшева М. А. – № 94007840/13 ; заявл. 01.03.1994 ; опубл. 10.12.1995.

39. А. с. 93039627 Российская Федерация, МПК С 13 С 1/08. Свеклорезный нож-сэндвич / Бугров М. Н., Богдан К. Э., Парневич А. И. – № 93039627/13 ; заявл. 03.08.1993 ; опубл. 20.08.1996.

40. А. с. 612959 Российская Федерация, МПК С 13 С 1/08. Свеклорезный нож / Турик Ю. А., Браницкий В. Н., Козуб А. И. – № 2332596/28-13 ; заявл. 30.06.1978 ; опубл. БИ № 24.

41. *Rudik, F. Ya. New in Manufacturing and Restoration of Meat-Processing Machines Cutting Tool / F. Ya. Rudik, M. Sh. Gutuew, I. L. Vorotnikov // Wuhan China Journal of Huzhoug Agricultural University. – 2000. – Vol. 19. – No. 3. – P. 292–296.*

42. *Рудик, Ф. Я. Совершенствование технологических процессов изготовления и восстановления режущего инструмента перерабатывающих предприятий / Ф. Я. Рудик. – М. : Росинформагротех, 2002. – 182 с.*

43. *Баутин, В. М. Новые ресурсосберегающие технологии восстановления упругих элементов / В. М. Баутин, Ф. Я. Рудик, С. Ю. Элькин. – М. : Росинформагротех, 2002. – 184 с.*

44. *Элькин, С. Ю. Инновационные ресурсосберегающие технологии восстановления упругих элементов пищевой промышленности / С. Ю. Элькин, Ф. Я. Рудик, А. А. Морозов. – Саратов : Наука, 2012. – 168 с.*

45. Рудик, Ф. Я. Технология изготовления и восстановления ножей крестовых штамповкой / Ф. Я. Рудик, Г. И. Медников, А. Г. Рыбалко // Достижения науки и техники в АПК. – 1995. – № 3. – С. 12–15.

46. Рудик, Ф. Я. Результаты реализации научных разработок в перерабатывающих отраслях АПК / Ф. Я. Рудик // Реализация технических разработок в АПК через технопарковые формирования : материалы науч.-практ. конф. – М. : Росинформагротех, 1996. – С. 28–30.

47. Рудик, Ф. Я. Современные требования к режущим рабочим органам перерабатывающих машин / Ф. Я. Рудик, М. Ш. Гутуев, И. Л. Воротников // Физико-технические проблемы создания новых технологий в АПК : сб. науч. тр. – Ставрополь, 2001. – Т. 1. – С. 173–175.

48. Пат. 213647 Российская Федерация, МПК В 23 Р 6/00. Штамп для восстановления крестовых ножей / Богатырев С. А., Воротников И. Л., Гутуев М. Ш., Рудик Ф. Я. ; заявители и патентообладатели Богатырев С. А., Воротников И. Л., Гутуев М. Ш., Рудик Ф. Я. – № 98106326 ; заявл. 06.07.1998 ; опубл. 10.09.1999, Бюл. № 25.

49. Пат. 2103139 Российская Федерация, МПК В 23 Р 6100, В 26 В 3/00. Штамп для восстановления крестовых ножей / Богатырев С. А., Колетуриин Е. Ф., Костин В. Д., Рудик Ф. Я., Федотов А. В., Фомин Р. Б., Гутуев М. Ш. ; заявитель и патентообладатель НПЦ «Волгоагротехника» при Саратовском государственном агроинженерном университете. – № 96108593 ; заявл. 29.04.1996 ; опубл. 27.01.1998, Бюл. № 3.

50. Рудик, Ф. Я. Формообразование ножей промышленных мясорубок при их восстановлении и изготовлении пластической деформацией / Ф. Я. Рудик, С. А. Богатырев, Л. Ю. Скрябина, В. П. Лялякин // Сб. науч. тр. – М. : ГОСНИТИ, 2014. – Т. 116. – С. 75–87.

51. Целесообразность восстановления и пути повышения ресурса режущего инструмента промышленных мясорубок / Ф. Я. Рудик [и др.]. // Сб. науч. тр. – М. : ГОСНИТИ, 2014. – Т. 115. – С. 128–133.

52. Рудик, Ф. Я. Повышение качества и ресурсосбережения при изготовлении инструмента для перерабатывающего оборудования / Ф. Я. Рудик, П. А. Андреев, А. Г. Рыбалко // Инженерно-техническое обеспечение АПК. – 1996. – № 2. – С. 13–15.

53. Рудик, Ф. Я. Технология изготовления ножей обвалочных прокаткой / Ф. Я. Рудик, В. Д. Костин, П. А. Андреев // Достижения науки и техники АПК. – 1995. – № 23. – С. 33–34.

54. Технология и оборудование для изготовления ножей обвалочных прокаткой / Ф. Я. Рудик [и др.] // Инженерно-техническое обеспечение АПК. – 1995. – № 4. – С. 24–26.

55. Установка для изготовления ножей обвалочных прокаткой / Ф. Я. Рудик [и др.] // Техника в сельском хозяйстве. – 1995. – № 5. – С. 21–24.

56. Технологический процесс прокатки лезвий к ножам / Ф. Я. Рудик [и др.] // Вестник машиностроения. – 1997. – № 7. – С. 41–42.

57. Рудик, Ф. Я. Расчет координат смещения центров деформирующих элементов при изготовлении клинков ножей обвалочных / Ф. Я. Рудик, Л. Ю. Скрыбина // Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рожд. проф. Вадивасова Д. Г. – Саратов, 2009. – С. 108–113.

58. Пат. 2042464 Российская Федерация, МПК В 21 Н 7/10. Устройство для прокатки изделий переменного профиля / Власов А. М., Колетури Е. Ф., Медников Г. И., Рудик Ф. Я. ; заявитель и патентообладатель малое предприятие «Икар» при НПЦ «Волгоагротехника». – № 92013620 ; заявл. 22.12.1992 ; опубл. 27.08.1995.

59. Пат. 2098214 Российская Федерация, МПК В 21 Н 7/10. Способ изготовления полуфабрикатов ножей / Андреев П. А., Богатырев С. А., Власов А. М., Колетури Е. Ф., Костин В. Д., Медников Г. И., Рудик Ф. Я. ; заявитель и патентообладатель НПЦ «Волгоагротехника». – № 96103774 ; заявл. 04.03.1996 ; опубл. 10.12.1997.

60. Пат. 2174056 Российская Федерация, МПК В 21 Н 7/16. Устройство для прокатки изделий с переменным профилем / Рудик Ф. Я., Гутуев М. Ш.,

Колетури́н Е. Ф., Киселев А. Е., Пахарев А. В., Воротников И. Л. ; заявители и патентообладатели Рудик Ф. Я., Гутуев М. Ш., Колетури́н Е. Ф., Киселев А. Е., Пахарев А. В., Воротников И. Л. – № 99120720 ; заявл. 29.09.1999; опубл. 27.09.2001.

61. ГОСТ Р 51644–2000. Ножи разделочные и шкурорезные. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2000. – 11 с.

62. ТУ 7188-001-49196500-07. Ножи туристические. Ножи разделочные. – М. : Стандартинформ, 2007. – 11 с.

63. СанПиН 42-123-42.40-86. Допустимые количества миграции (ДМК) химических веществ. Методы определения. – М., 1986. – 6 с.

64. Патент на полезную модель 100013 Российская Федерация, МПК В 26 В 3/00. Разделочный нож / Рукавишникова А. А. ; заявитель и патентообладатель Рукавишникова А. А. – № 2010136523 ; заявл. 02.09.2010 ; опубл. 10.12.2010.

65. Пат. 2127186 Российская Федерация, МПК В 26 В 3/00, В 26 В 1/10. Нож / Баранов О. В., Вахрушев А. Н., Хакимов Р. Х. ; заявитель и патентообладатель товарищество с ограниченной ответственностью фирма «БАСКО». – № 98103008 ; заявл. 03.02.1998 ; опубл. 10.03.1999.

66. Патент на полезную мододелю 111013 Российская Федерация, МПК 26В3/00. Разделочный нож / Рукавишникова А. А. ; заявитель и пентообладатель Рукавишникова А. А. – № 2010136523 ; заявл. 02.09.2010 ; опубл. 10.12.2010.

67. *Скрябина, Л. Ю.* Повышение эксплуатационных показателей ножей обвалочных путем их формообразования пластической деформацией : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Скрябина Лариса Юрьевна. – Саратов, 2004. – 18 с.

68. Машины и аппараты пищевых производств / под ред. В. А. Панфилова. – М. : Высшая школа, 2001. – 699 с.

69. Основы расчета и конструирования машин / под ред. А. Я. Соколова. – М. : Мир, 1989. – 350 с.

70. *Вольф, Т. Т.* Кинетика процессов измельчения упруговязких и вязкопластичных сельскохозяйственных материалов / Т. Т. Вольф. – Новосибирск, 2008. – 116 с.
71. *Воропаева, В. С.* Нарушения в технологии свеклосахарного производства : учебное пособие / В. С. Воропаева. – Жердевка, 2012. – 8 с.
72. *Спичак, В. В.* Развитие сахарной промышленности в России / В. В. Спичак, В. Б. Остроумов. – Курск : РНИИСП, 2010. – С. 18–21.
73. *Гребенюк, С. М.* Усилие на ноже при резании сахарной свеклы / С. М. Гребенюк, В. Г. Белик, А. М. Щербаков // Известия вузов СССР. Пищевая технология. – 1982. – № 6. – С. 88–94.
74. *Джента, Дж.* Накопление кинетической энергии / Дж. Джента. – М. : Мир, 1988. – 428 с.
75. *Гребенюк, С. М.* Исследования силовых взаимодействий сахарной свеклы с барабаном свеклорезок / С. М. Гребенюк, С. М. Щербаков // Сахарная промышленность. – 1981. – № 2. – С. 22–25.
76. Резание пищевых продуктов лезвием / М.Н. Клименко [и др.] // Известия вузов СССР. Пищевая технология. – 1977. – № 3. – С. 90–93.
77. *Щеголев, В. Н.* Перемещение и вращение сахарной свеклы в силовом поле резок при резании их в стружку / В. Н. Щеголев // Сб. науч. тр. – М. : ВНИИСИП, 1964. – Вып. 10. – С. 34.
78. *Фабричникова, И. А.* Условия образования стружки при срезании корнеплода сахарной свеклы сахарным ножом / И. А. Фабричникова, В. В. Коломиец // Вестник НТУ ХПИ. – 2010. – № 46. – С. 267–272.
79. *Цывильский, В. П.* Теоретическая механика : учебник / В. П. Цывильский. – М., 2014. – 368 с.
80. Теоретическая механика. Высшее образование / Н. Г. Васько [и др.]. – М. : Феникс, 2012. – 304 с.
81. *Эрдеди, А. А.* Теоретическая механика / А. А. Эрдеди, Н. А. Эрдеди. – М. : КноРус, 2012. – 208 с.

82. *Чуркин, В. М.* Теоретическая механика в решениях задач из сборника И. В. Мелярского / В. М. Чуркин. – СПб. : Ленанд, 2014. – 388 с.
83. *Артоболевский, И. И.* Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский. – М., 2012. – 640 с.
84. *Чмиль, В. Л.* Теория механизмов и машин / В. Л. Чмиль. – М. : Лань, 2012. – 288 с.
85. *Леонов, И. В.* Теория механизмов и машин. Основы наук / И. В. Леонов. – М. : Высшее образование, 2009. – 240 с.
86. *Беляев, Н. М.* Сопротивление материалов / Н. М. Беляев. – М. : Альянс-С, 2014. – 608 с.
87. *Сапунов, В. Т.* Краткий курс сопротивления материалов в решении задач / В. Т. Сапунов. – СПб. : Либроком, 2013. – 160 с.
88. *Буланов, Э. Р.* Решение задач по сопротивлению материалов / Э. Р. Буланов. – М. : Бином, 2012. – 216 с.
89. *Молотников, В. М.* Механика конструкций. Теоретическая механика. Сопротивление материалов / В. М. Молотников. – СПб. : Лань, 2013. – 544 с.
90. *Котляров, А. А.* Теоретическая механика и сопротивление материалов : компьютерный практикум / А. А. Котляров. – М. : Феникс, 2014. – 320 с.
91. *Сергеев, А. К.* Сопротивление материалов, теория упругости и пластичности / А. К. Сергеев. – М., 2013. – 250 с.
92. *Бидерман, В. Л.* Теория механических колебаний / В. Л. Бидерман. – М. : Высшая школа, 1980. – 400 с.
93. *Бабаков, А. М.* Теория колебаний / А. М. Бабаков. – М. : Дрофа, 2004. – 591 с.
94. *Пановко, Я. Г.* Введение в теорию механических колебаний / Я. Г. Пановко. – 2-е изд. – М. : Наука, 1980. – 321 с.
95. *Вольмир, А. С.* Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир. – М. : Наука, 1984. – 984 с.

96. *Алфутов, Н. А.* Основы расчета на устойчивость упругих систем / Н. А. Алфутов. – М. : Машиностроение, 1978. – 312 с.
97. *Агапов, А. П.* Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости пространственных тонкостенных подкрепленных конструкций : учебное пособие / А. П. Агапов. – М. : АСВ, 2000. – 152 с.
98. *Рудик, Ф. Я.* Обеспечение показателей надежности ножей для измельчения сахарной свеклы / Ф. Я. Рудик, Л. Ю. Скрябина, А. П. Ковылин // Научное обозрение. – 2012. – № 6. – С. 160–164.
99. *Пойда, А. А.* Тепловозы : механическое оборудование : устройство и ремонт: учебник / А. А. Пойда, Н. М. Хуторянский, В. Е. Кононов. – М. : Транспорт, 1988. – 320 с.
100. *Вольф, Б. К.* Авиационное материаловедение / Б. К. Вольф, К. П. Ромадин. – М. : Машиностроение, 1967. – 388 с.
101. *Hawkyard, J. B.* An analysis of the changes in geometry of a short hollow cylinder during axial compression / J. B. Hawkyard, W. Johnson // Int. j. Mech. Sci. 9: 1967.
102. *Уик, Ч.* Обработка металлов без снятия стружки / Ч. Уик. – М. : Мир, 1965. – 235 с.
103. *Хензель, А.* Расчет энергосиловых параметров в процессе обработки металлов давлением : справочник / А. Хензель, Т. Шпигель. – пер. с нем. – М. : Металлургия, 1982. – 360 с.
104. *Надаи, А.* Пластичность и разрушение твердых тел / А. Надаи. – М. : Мир, 1969. – Т. 2 – 436 с.
105. *Рудик, Ф. Я.* Моделирование процесса осадки поверхности переменного профиля / Ф. Я. Рудик, Л. Ю. Скрябина, А. П. Ковылин // Научное обозрение. – 2011. – № 5. – С. 18–20.
106. *Лисицын, А. И.* Моделирование процессов обработки металлов давлением / А. И. Лисицын, В. Я. Острячко. – Киев : Техника, 1976. – 206 с.
107. *Сторожев, М. В.* Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.

108. Гунн, Г. Я. Теоретические основы обработки металлов давлением / Г. Я. Гунн. – М. : Metallurgiya, 1980. – 456 с.
109. Influence of grain size on plastic anisotropy in low-carbon steels-materials // Science and Technology. – 1986. – Vol. 2. – No. 4. – P. 352–354.
110. Смирнов-Аляев, Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию / Г. А. Смирнов-Аляев. – Л. : Машиностроение, 1978. – 386 с.
111. Лопухин, П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П. И. Лопухин, Г. Я. Гунн, А. М. Галкин. – М. : Metallurgiya, 1983. – 352 с.
112. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин : справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М. : Машиностроение, 1979. – 702 с.
113. Александров, А. В. Основы теории упругости и пластичности / А. В. Александров, В. Д. Потапов. – М. : Высшая школа, 1990. – 400 с.
114. Самогин, Ю. Н. Метод конечных элементов в динамических задачах сопротивления материалов / Ю. Н. Самогин, В. П. Радин, В. П. Чирков. – М. : Физматлит, 2013. – 314 с.
115. 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.
116. Патент на полезную модель № 150113 Российская Федерация, МПК В 21 Н 7/10. Устройство для изготовления режущих инструментов / Рудик Ф. Я., Богатырев С. А., Ковылин А. П. и др. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – № 2014116686 ; заявл. 24.04.2014 ; опубл. 27.01.2015.
117. Рудик, Ф. Я. Расчет координат смещения центров деформирующих элементов при изготовлении клинков ножей обвалочных / Ф. Я. Рудик, Л. Ю. Скрябина // Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рожд. профессора Вадивасова Д. Г. – Саратов, 2009. – С. 108–113.

118. Пат. 2042464 Российская Федерация, МПК В 23 З 6/00. Устройство для прокатки изделий переменного профиля / Власов А. М., Колетури́н Е. Ф., Мерников Г. И., Рудик Ф. Я. ; заявитель и патентообладатель малое предприятие «Икар» при НПЦ «Волгоагротехника». – № 92013620 ; заявл. 22.12.1992 ; опубл. 27.08. 1995, Бюл. № 24.

119. Пат. 2098214 Российская Федерация, МПК В 23 З 6/00. Способ изготовления полуфабрикатов лезвий ножей / Андреев П. А., Богатырев С. А., Власов А. М., Колетури́н Е. Ф., Костин В. Д., Медников Г. И., Рудик Ф. Я. ; заявитель и патентообладатель НПО «Волгоагротехника». – № 96103774 ; заявл. 4.03.1996 ; опубл. 10.12.1997, Бюл. № 34.

120. *Завалишин, Ф. С.* Методы исследования по механизации сельского хозяйства / Ф. С. Завалишин. – М. : Колос, 1981. – 213 с.

121. *Очков, Ф. В.* Matchcad PLUS 6.0 для студентов и инженеров / Ф. В. Очков. – М. : Компьютер ПРЕСС, 1966. – 237 с.

122. *Геллер, Ю. А.* Материаловедение / Ю. А. Геллер, А. Г. Рахштадт. – М. : Металлургия, 1975. – 447 с.

123. *Фетисов, Г. Г.* Материаловедение и технология металлов / Г. П. Фетисов. – М. : Высшая школа, 2001. – 640 с.

124. *Коваленко, В. С.* Металлографические реактивы. – М. : Высшая школа, 1970. – 133 с.

125. ГОСТ 9013–59 (ИСО6508–86). Металлы. Метод измерения твердости. – М. : Изд-во Стандартов, 2001. – 5 с.

126. *Фридман, Я. Б.* Механические свойства металлов / Я. Б. Фридман. – М. : Машиностроение, 1947. – 827 с.

127. Технология металлов и материаловедение / под. ред. Л. Ф. Усовой. – М. : Металлургия, 1987. – 800 с.

128. Технологические остаточные напряжения / под. ред. А. В. Подзея. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.

129. *Китайгородский, А. И.* Рентгеноструктурный анализ мелкокристаллических и аморфных тел / А. И. Китайгородский. – М. ; Л. :

Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 2013. – 589 с.

130. *Рассел, Д.* Рентгеноструктурный анализ / Д. Рассел. – М., 2012. – 96 с.

131. *Биргер, И. А.* Остаточные напряжения / И. А. Биргер. – М. : Машгиз, 1963. – 232 с.

132. *Горелик, С. С.* Рентгенографический и электроноскопический анализ / С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скоков. – М. : Metallurgia, 1970. – 366 с.

133. *Русаков, А. А.* Рентгенография металлов / А. А. Русаков. – М. : Атомиздат, 1977. – 348 с.

134. *Миркин, Л. И.* Справочник по рентгеноструктурному анализу / Л. И. Миркин. – М. : Физматиздат, 1960. – 243 с.

135. *Суслов А. Г.* Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. – М. : Машиностроение, 2000. – 320 с.

136. *Дрободерова, О. С.* Определение остаточных напряжений в поверхностном слое детали при совместной обработке точением и обкатыванием / О. С. Дрободерова, Т. Г. Ивченко. – Донецк : ДонНТУ, 2005. – С. 132–135.

137. *Непомилуев, П. А.* Методика проектирования технологических процессов обработки распределительных валов / В. В. Непомилуев, П. А. Соловьева, Е. Е. Цедейко // *Авіаційно-космічна технологія*. – Харків, 2003. – Вип. 5(40). – С. 134–137.

138. ГОСТ 25.504–82. Расчеты испытаний на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости : межгосударственный стандарт. – М. : Стандартиформ, 2012. – 72 с.

139. *Махутов, Н. Л.* Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность / Н. А. Махутов. – М. : Машиностроение, 1981. – 272 с.

140. *Березин, И. Я.* Сопротивление материалов. Усталостное разрушение металлов и расчеты на прочность и долговечность при переменных нагрузках / И. Я. Березин, О. Ф. Чернявский. – Челябинск, 2003. – 76 с.

141. ГОСТ 30480–97. Обеспечение износостойкости изделий. Методы

испытаний на износостойкость. Общие требования : межгосударственный стандарт. – Минск : Стандартиформ, 1997. – 21 с.

142. *Маслов, В. Е.* Экспериментальное исследование процессов обработки металлов давлением / В. Е. Маслов, В. Н. Шаповал. – Киев : Высшая школа, 1983. – 232 с.

143. Microsoft Excel. –2010.

144. *Веденягин, В. Г.* Общая методика экспериментальных исследований и обработка опытных данных / В. Г. Веденягин. – М. : Колос, 1970. – 136 с.

145. *Румшинский, Л. З.* Математическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Румшинский. – М. : Наука, 1971. – 192 с.

146. *Спиридонов, А. А.* Планирование эксперимента при исследовании технологического процесса / А. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 182 с.

147. Технология конструкционных материалов / под. ред. А. М. Дольского. – М. : Машиностроение, 1990. – 352 с.

148. *Рудик, Ф. Я.* Монтаж, эксплуатация и ремонт оборудования перерабатывающих предприятий / Ф. Я. Рудик, Н. В. Юдаев, В. Н. Буйлов. – СПб. : ГИОРД, 2008. – 351 с.

149. *Кончевская, М. Г.* Экологическое обоснование проектируемых предприятий / М. Г. Кончевская. – Архангельск : АГТУ, 2005. – 58 с.

150. *Коротнев, В. Д.* Организация и управление производством : учебное пособие / В. Д. Коротнев Л. Б. Виличок, Г. Н. Коустова. – М. : Колос, 2005. – 464 с.

151. *Шакиров, Ф. К.* Организация производства на предприятиях : учебное пособие для вузов /Ф. К. Шакиров. – М. : Колос, 2004. – 224 с.

152. Методика определения экономической эффективности новой технологии в АПК. – М. : Минсельхоз РФ, 1998. – 168 с.

153. *Краюхин, Г. А.* Экологическая эффективность изобретений и рационализаторских предложений / Г. А. Краюхин. – Л. : Лениздат, 1983. – 120 с.

154. *Петухов, Р. М.* Оценка эффективности промышленного производства / Р. М. Петухов. – М. : Экономика, 1990. – 35 с.

# ПРИЛОЖЕНИЯ



ножей. Таким образом, от показателей износостойкости и усталостной прочности ножей зависит не только качество стружки, но и показатели наработки на отказ и предельного их состояния, не вскрыты явления, общим недостатком ножа и выносливость на изгиб. Предложенная упрочнения ножей может повысить поверхности, а усталостная прочность, ножа и являющаяся также преваляющим, осуществляется на специальном заточном станке МЗ-375, рисунок 2.

Конструкция используемых для измельчения сахарной свеклы ножей с момента обнаружения в 1747 году немецким химиком А. С. Маргграфом в белой свекле сахара и по настоящий день постоянно совершенствуется. Все начиналось с обыкновенной ручной терки и отжима полученной кашки. В последующем ножи приняли гребенчатую форму и, что характерно, принципиального конструктивного изменения не претерпевали.

В частности П. С. Сичевой в 50-х годах [35,36] предложил систему, состоящую из пластинчатого свеклорезного ножа и сборного гребенчатого ножа изготовленных из отдельных тонких с заточенными кромками пластинок с прокладками, соответствующими заданной ширине стружки, набранной на оправку, рисунок 16

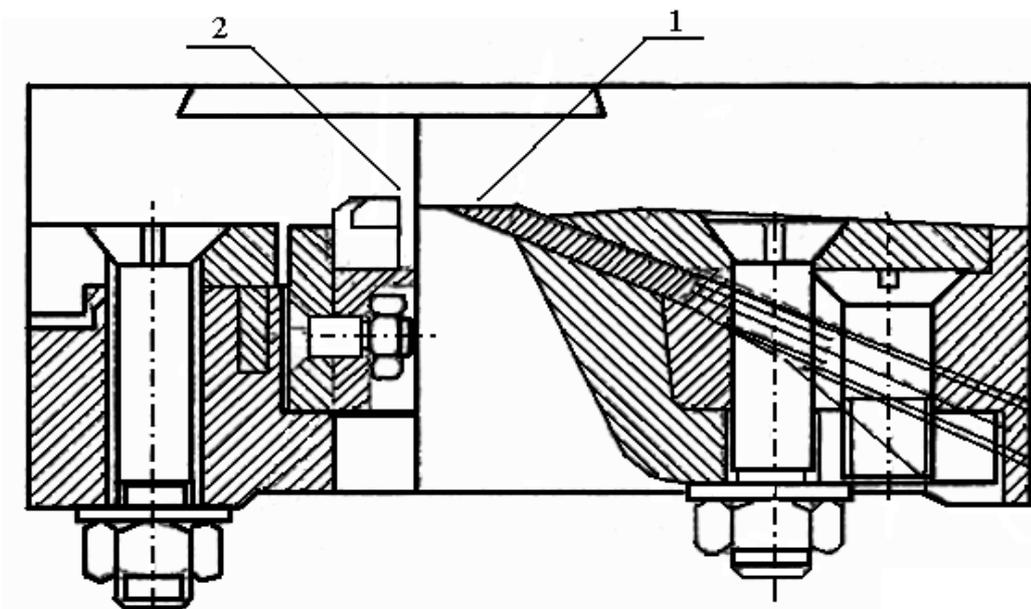


Рисунок 2 – Пластинчатый режущий аппарат

Измельчение сахарной свеклы осуществляется режущими элементами - горизонтальной пластиной 1 и гребенчатыми наборными пластинами 2. Целью изобретений было создание легкорегулируемого измельчающего аппарата, но в реальности предложен неработоспособный инструмент с очень низкими показателями ремонтпригодности и усталостной устойчивости сборной гребенчатой части.

Изобретение авторов [35,36] направлено на создание клиновидных элементов, служащих для рассечения слоя свеклы на заданную глубину, рисунок 17.

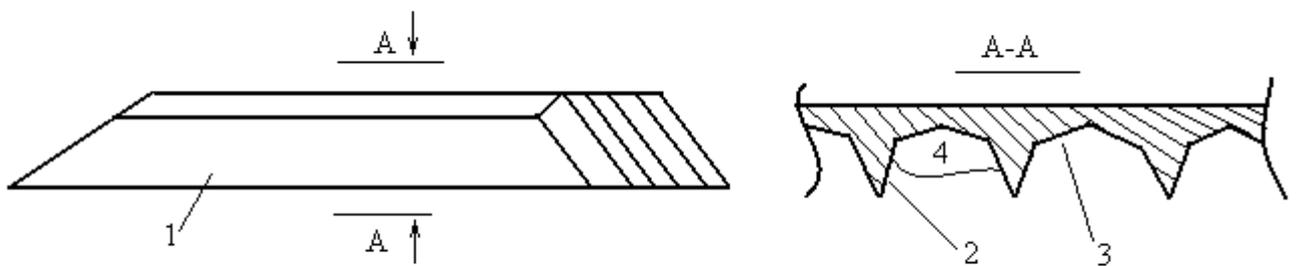


Рисунок 3 – Свеклорезный нож с клиновидными режущими гранями

Обоснованием авторов данная конструкция устраняет недостатки по параметру качества стружки [37,38] по причине поперечного сдвига измельчаемой свеклы. Хотя гребенчатая часть и предназначена для устранения сдвига. Предлагаемая конструкция также не может считаться оптимальной. Процесс резания должен быть крайне затруднен, так как резко возрастают усилия от вертикальной силы резания  $P_y$ , горизонтальной -  $P_x$  и скользящих касательных усилий  $P_\tau$ , рисунок 6 (1.2). Вызывает сомнение возможность получения качественной стружки, так как при резании в клиновидных режущих гранях 1 при возрастании силы трения в двух режущих гранях 2,3 стружка должна защемляться в закрытом пространстве 4 и забивать инструмент. Конструкция режущих граней вызовет технологические затруднения при изготовлении, что скажется на себестоимости инструмента, а показатель ремонтпригодности при заточке

режущей кромки низок по причине необходимости нескольких переналадок заточного инструмента.

В работе [39] предложена конструкция слоистого ножа, по определению авторов его преимуществом является дешевизна инструмента. И эта цель достигается тем, что нож изготавливается трехслойным из разных по химсоставу сплавов, при этом средний является режущим, а два крайних представляют собой обойму. Способ изначально неработоспособен для измельчения сахарной свеклы, так как свекла должна изрезываться в стружку для высвобождения свекловичного сока из вакуолей, а не просто измельчаться.

### Математическая модель процесса деформации.

Обработкой полученных экспериментальных данных, выполненных по рекомендациям [144-145] получена регрессионная модель, адекватно описывающая зависимость усилия деформации от температуры нагрева и скорости деформирования

$$P = [1 - 0,1389 \cdot \ln(Vg)] \cdot \left[ 118 \left( 1 + \frac{698,7}{T - 856,3} \right) - 1 \right]^{0,5324}, \quad (1)$$

где  $Vg$  – скорость деформирования, м/с;

$T$  – температура преддеформационного нагрева, °С.

Критерием Фишера установлена однородность дисперсии, составляющая 5 %. Адекватность модели подтверждена 95 % сходимостью. Форма поверхности отклика регрессионной модели, рисунок 1, устанавливает взаимосвязь температуры нагрева с усилием деформации и скорости деформирования.

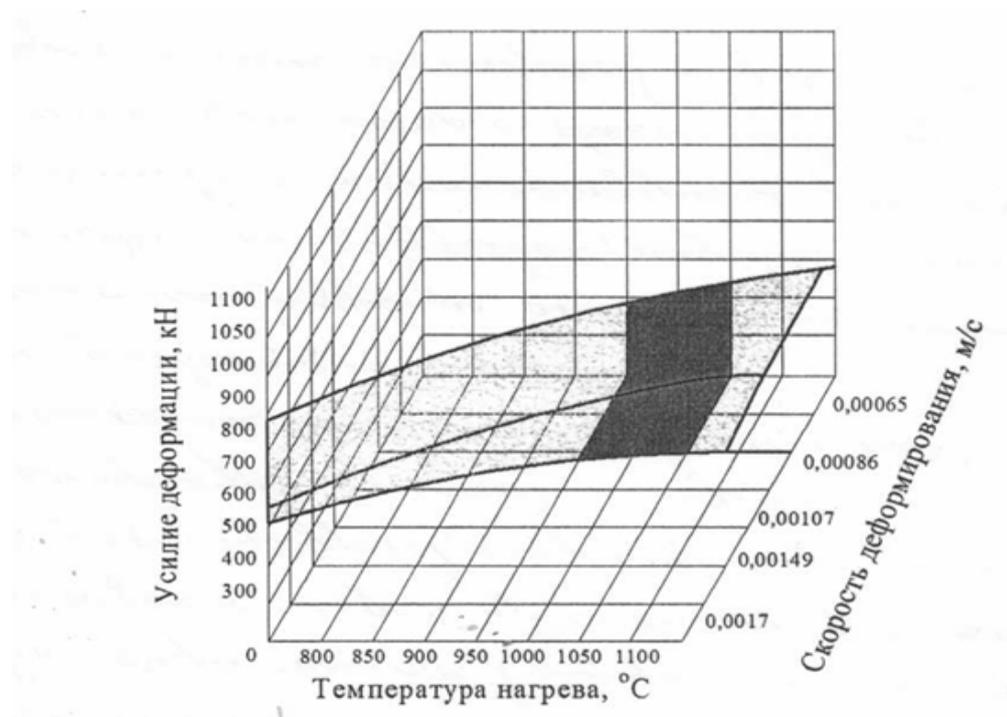


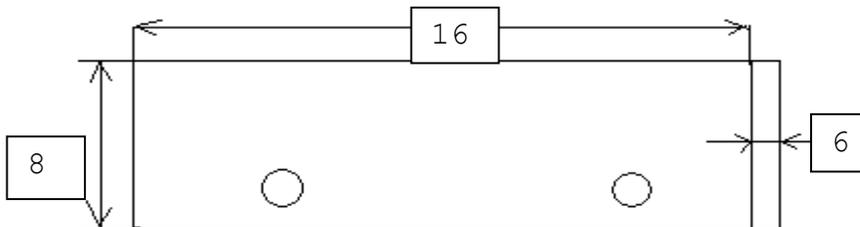
Рисунок 1 – Модель зависимости режимных составляющих при пластической деформации

Данные математического моделирования экспериментальных данных со сходимостью 95 % также подтверждают рациональные режимные параметры формообразования ножей свеклорезных, находящихся в интервале:

- температура преддеформационного нагрева 1000 – 1050 °С;
- усилие деформации 750 – 550 кН;
- скорость деформирования 0,00085 – 0,00075 м/с.

### Данные микрометричных исследований деформации заготовок в штамповой оснастке

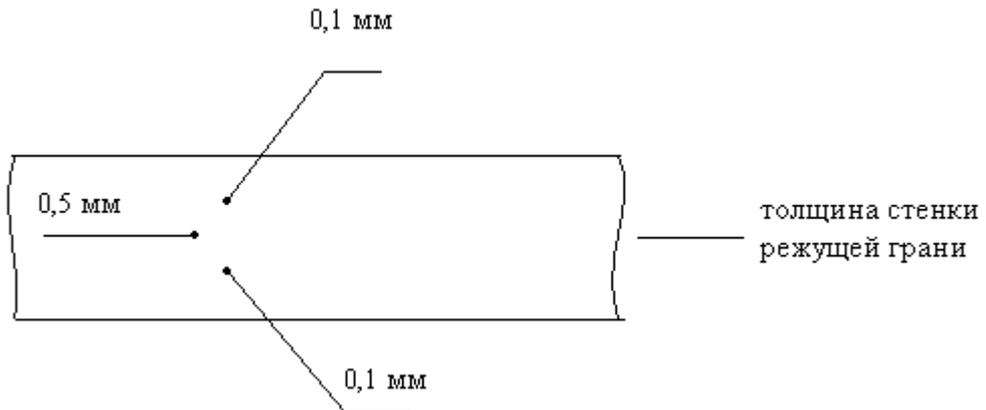
При исследовании технологического процесса изготовления ножей в штамповой оснастке использовалась заготовка из стали 40\*13, размеры и форма которых обоснованы расчетным методом, (таблица 3, раздел 2 диссертации)



№ п.п.	Проверяемые параметры деформационной заготовки			
	Ширина привалочной плоскости 45 мм по чертежу	Длина режущих граней, 48 мм по чертежу	Толщина стенок режущих граней, мм	Угол граней ромбических поверхностей, град.
1	45 во всех образцах обеспечивается стабильно за счет установочных на штифты штампа 2 отверстий в заготовки	49,34	2,86	75 Во всех образцах обеспечивается стабильно за счет конструкции матрицы и пуансона штампа
2		49,62	2,44	
3		50,03	2,56	
4		50,04	2,74	
5		49,83	2,76	
6		49,88	2,91	
7		49,92	3,02	
8		49,87	2,77	
9		49,88	3,04	
10		49,85	3,02	
11		49,83	3,02	
12		49,52	2,76	
13		49,63	2,83	
14		50,01	3,02	
15		49,73	2,81	
16		49,82	3,01	
17		50,04	3,01	
18		49,75	2,73	
19		49,79	2,82	
20		50,02	2,76	

**Данные исследований микротвердости образцов из ножей, изготовленных по традиционной и экспериментальной технологиям**

При исследовании микротвердости образцов замеры показателей велись по схеме



№ п.п.	Показатели микротвердости VB, МПа					
	По традиционной технологии изготовления			По экспериментальной технологии изготовления		
	Расстояние от стенки, 1,0 м	Расстояние от стенки, 0,5 мм	Расстояние от стенки, 0,1 мм	Расстояние от стенки, 1,0 м	Расстояние от стенки, 0,5 мм	Расстояние от стенки, 0,5 мм
1	484	482	480	550	549	551
2	475	479	478	570	552	570
3	485	486	485	583	554	581
4	480	481	480	578	550	576
5	475	475	476	584	549	584
6	471	464	470	575	551	575

### Данные исследований выносливости на изгиб свеклорезных ножей

Исследование свеклорезных ножей по параметру выносливости на изгиб велись на модернизированной вибрационной установке ВУ 5/5000 по схеме и методике, представленных в подразделе 3.6 диссертации в соответствии с ГОСТ 25.504-82

Показатели выносливости на изгиб			
Ножи, традиционной конструкции и технологии		Ножи, изготовленные по экспериментальной конструкции и технологии	
Время испытаний, час	Число циклов нагружений, $R \cdot 10^6$	Время испытаний, час	Число циклов нагружений, $R \cdot 10^6$
24	2,85	24	4,21
48	4,91	48	6,16
72	6,53	72	6,89
96	6,92	96	8,37
120	7,48	120	9,39
144	8,11	144	10,38

**Данные исследований износостойкости свеклорезных ножей по  
показателю износостойкости в соответствии с ГОСТ 30480-97**

№ п.п.	Показатели износостойкости				
	Ножи традиционной конструкции и технологии изготовления		Ножи экспериментальной конструкции и технологии изготовления		
	Наработка, час	Величина износа, м*10 <sup>-6</sup>	Наработка, час	Величина износа, м*10 <sup>-6</sup>	Относительная износостойкост ь
1	15	20,02	15	19,02	1,025
2	30	21,14	30	19,51	1,050
3	45	22,01	45	19,98	1,100
4	60	23,95	60	19,98	1,160
5	75	25,34	75	20,24	1,185
6	90	26,22	90	21,45	1,200
7	105	27,95	105	22,04	1,225
8	120	29,76	120	23,24	1,250

### **Производственных испытаний ножей для измельчения сахарной свеклы в центробежных свеклорезных установках**

На основании договора о научно-исследовательской работе ОАО «Балашовский сахарный комбинат» и ФГБОУ «Саратовский аграрный университет им. Н. И. Вавилова» от 12 октября 2013 на тему: «Повышение эффективности измельчения сахарной свеклы упрочненными ножами усовершенствованной конструкции» для проведения производственных испытаний создана комиссия в составе:

- от ОАО «Балашовский сахарный комбинат»

- ФГБОУ «Саратовский аграрный университет им. Н. И. Вавилова».

к.т.н., доцент Скрябина Л.Ю. , аспирант Ковылин А. П. –кафедра «Процессы и аппараты пищевых производств».

В качестве объекта исследования приняты:

- ножи свеклорезные экспериментальные новой конструкции с повышенными показателями износостойкости и усталостной прочности, разработанные в СГАУ им. Н. И. Вавилова, изготовленные из стали 40Х13;

- ножи свеклорезные традиционные, соответствующие ТУ 3-7501003-27-94, изготовленные механической обработкой, изготовленные из стали У7;

- показатели качества свеклорезной стружки при измельчении свеклы в центробежной свеклорезной установке.

Цель испытаний:

- установление показателей эксплуатационной надежности экспериментальных свеклорезных ножей, сравнение показателей результатов испытаний с данными ножей, изготовленных по традиционной технологии;

- проведение анализа качества свекловичной стружки, произведенной с использованием экспериментальных и традиционных ножей.

Методика исследований:

- с целью создания идентичных условий испытаний центробежная свеклорезная установка должна укомплектовываться двухножевыми рамками с ножами по схеме: 1,3,5,7,9 – рамки с традиционными ножами и 2,4,6,8 – рамки с экспериментальными ножами;

- контроль технического состояния ножей осуществлять в соответствии с регламентом, установленным на предприятии;

- контроль размеров и режущих граней ножей осуществлять ежемесячно во время проведения технического обслуживания оборудования;

- контроль качества свекловичной стружки проводить ежемесячно в установленные периоды времени, соответствующие остановке установки на ежемесячное техническое обслуживание;

- контроль технического состояния ножей и качества свекловичной стружки вести до достижения ножами предельного состояния.

Результаты испытаний

Сравнительными эксплуатационными испытаниями ножей, изготовленных

по традиционной и экспериментальной технологиям, установлены основные показатели технического состояния режущих граней и кромок, характеризующих:

- износостойкость и усталостную прочность, обуславливающих свойства безотказности, долговечности и ремонтпригодности ножей;
- функциональные и параметрические состояния, устанавливающие соответствие объектов исследования к измельчению сахарной свеклы в соответствии с нормативными требованиями.

Таблица–Результаты производственных испытаний.

№/№ рамок и ножей	Время испытаний, ч	Контролируемые параметры				Проницаемость, %	Примечание				
		Изменение длины грани, мм		Качество стружки м/100 г массы							
		до заточки	после заточки	до заточки	после заточки						
1 1Т 2Т	8	0,19	0,70	12,41	10,24	190,5					
3 3Т 4Т		0,20									
5 5Т 6Т		0,21	0,71								
7 7Т 8Т		0,20									
2 1э 2э	8	0,10	0,41	12,78	11,51	191,5					
4 3э 4э		0,11									
6 5э 6э		0,09	0,40								
8 7э 8э		0,10	0,41								
1 1Т 2Т	16	0,82	1,32	11,28	9,56	185,3					
3 3Т 4Т		0,81									
5 5Т 6Т		0,83	1,33					Разрушения граней ножа			брак
7 7Т 8Т		0,80	1,31								
		0,81	1,32								
		0,82									

2 1э	16	0,71	1,01	12,11	10,80	188,9	
2э		0,70					
4 3э	16	0,71	0,99	12,11	10,80	188,9	
4э		0,69					
6 5э		0,70	1,01				
6э		0,71					
8 7э		0,69	1,00				
8э		0,70					
1 1Г		1,52	2,04	10,18	8,91	176,4	
2Г		1,52					
3 3Г	24	1,53	2,05	10,18	8,91	176,4	Не контр.
4Г		1,54					
5 5Г	24	Замена ножа		10,18	8,91	176,4	Не контр.
6Г		1,53	2,03				
7 7Г		1,52	2,04				
8Г		1,53					
2 1э		1,22	1,52	10,65	10,43	182,2	
2э		1,20					
4 3э	24	1,18	1,48	10,65	10,43	182,2	
4э		1,17					
6 5э	24	1,20	1,51	10,65	10,43	182,2	
6э		1,21					
8 7э		1,18	1,48				
8э		1,18					
1 1Г		2,24	2,75	9,57	8,53	156,2	
2Г		2,25					
3 3Г	32	2,25	2,76	9,57	8,53	156,2	Не контр.
4Г		2,26					
5 5Г	32	Замена ножа		9,57	8,53	156,2	Не контр.
6Г		2,23	2,73				
7 7Г		Разрушения граней ножа					брак
8Г		2,22	2,73				
2 1э		1,62	1,92	11,18	10,20	171,1	
2э		1,60					
4 3э	32	1,56	1,86	11,18	10,20	171,1	
4э		1,55					
6 5э	32	1,62	1,93	11,18	10,20	171,1	
6э		1,63					
8 7э		1,58	1,88				

8э		1,56										
1 1Т 2Т	40	2,93 2,92	3,43	9,09	8,18	128,4						
3 3Т		2,94	3,45									
4Т		2,95										
5 5Т		Замена ножа						Не контр.				
6Т		2,92										
7 7Т		Замена ножа						Не контр.				
8Т		2,96										
2 1э 2э		40	2,22 2,20				2,52	10,75	9,91	164,3		
4 3э 4э	2,16 2,17		2,47									
6 5э 6э	2,22 2,23		2,53									
8 7э 8э	2,17 2,16		2,47									
1 1Т 2Т	48		3,63 3,62	4,13	8,50	7,79	103,2					
3 3Т 4Т			3,65 3,66	4,16								
5 5Т			Замена ножа									Не контр.
6Т			3,63	4,14								
7 7Т		Замена ножа						Не контр.				
8Т		Разрушения граней ножа						брак				
2 1э 2э		48	2,63 2,62	2,93				10,45	9,57	151,2		
4 3э 4э			2,57 2,57	2,87								
6 5э 6э	2,62 2,63		2,93									
8 7э 8э	2,56 2,57		2,87									
1 1Т 2Т	56		4,38 4,36	4,86	7,97	7,61	97,4					
3 3Т 4Т			4,37 4,38	4,88								
5 5Т			Замена ножа									Не контр.
6Т			4,36	4,86								

7 7Т		Замена ножа					Не контр.		
8Т		Замена ножа					Не контр.		
2 1э	56	3,07	3,37	10,00	9,18	138,5			
2э		3,08							
4 3э		3,02	3,33						
4э		3,03							
6 5э		3,06	3,36						
6э	3,06								
8 7э	64	3,03	3,34	7,21	83,1	83,1	Не контр.		
8э		3,04					Не контр.		
1 1Т	64	5,04	5,56	7,21	83,1	83,1	Не контр.		
2Т		5,06					Не контр.		
3 3Т		5,06	5,56				Не контр.		
4Т		5,05					Не контр.		
5 5Т		Замена ножа						Не контр.	
6Т	5,04	5,54		Не контр.					
7 7Т	72	Замена ножа		9,12	8,47	103,1	103,1		
8Т		Замена ножа							
2 1э	64	3,48	3,37	8,95	8,77	123,4			
2э		3,46							
4 3э		Разрушение граней ножа					3,74	брак	
4э		3,43							
6 5э		3,45	3,75						
6э	3,45								
8 7э	72	3,45	3,76	9,12	8,47	103,1	103,1		
8э		3,46							
2 1э	72	3,89	4,20	9,12	8,47	103,1	103,1		
2э		3,90							
4 3э		Замена ножа							Не контр.
4э		3,84							
6 5э		4,15							
6э	3,86	4,16							
8 7э	72	3,84		9,12	8,47	103,1	103,1		
8э		3,85	4,15						
		3,83							

2 1э 2э	80	4,30 4,31	4,61	8,77	8,24	97,6	Не контр.
4 3э 4э		Замена ножа 4,24 4,55					
6 5э 6э		4,27 4,25	4,57				
8 7э 8э		4,26 4,27	4,57				
2 1э 2э	88	4,72 4,70	5,02	8,02		93,1	Не контр.
4 3э 4э		Замена ножа 4,65 4,96					
6 5э 6э		4,69 4,68	4,99				
8 7э 8э		4,68 4,68	4,98				

## Обработка данных эксперимента

В барабане центробежной свеклорезной установки (ЦСУ) смонтированы 12 двух-ножевых рамок. Исследования проводились по схеме: в рамках 1,3,5,7 установлены по 2 традиционных ножа (Т-нож) и в рамках 2,4,6,8 – по 2 экспериментальных ножа (Э-нож). То есть исследовались 4 рамки с 8-ю традиционными ножами и 4 рамки с 8-ю экспериментальными ножами. Каждые 8 часов ЦСУ останавливали на обслуживание и проводили измерения. Всего было сделано 11 измерений, 88 часов работы.

Измерялось укорачивание длины ножей до и после заточки, будем это называть износ ножей. Разрушенный нож исключался из измерений. Разрушились 3 Т-ножа: через 24, 32 48 часов. Разрушился всего 1 Э-нож через 64 часа.

Измерялась длина стружки (в метрах) в 100 граммах навески: перед остановкой ЦСУ и после возобновления работы.

Определялась проницаемость, которая характеризует извлекаемость сахара из стружки. Она зависит от качества измельчения: длина стружки (м) и степень поверхностных разрушений. При значениях проницаемости ниже 80-90% извлекать сахар экономически не выгодно.

Направления исследований числовых данных эксперимента.

1. Показать сравнительную износостойкость Э-ножей и Т-ножей.
2. Показать сравнительные показатели качества стружки.

### *Износ ножей*

Оценка износного состояния анализировалась по данным рисунка. По точкам построены линейные тренды, регрессионные уравнения 1-го порядка:

$$y = 0,0873 \times x - 0,5457 \quad R^2 = 0,9997 \quad \text{для Т-ножей} \quad (1)$$

$$y = 0,0567 \times x - 0,2031 \quad R^2 = 0,9967 \quad \text{для Э-ножей} \quad (2)$$

Здесь  $y$  – износ ножей (в мм),  $x$  – время работы (в часах),

Чтобы не зависеть от размерности исходных данных, для характеристики качества регрессионного уравнения вычисляется безразмерная величина, коэффициент детерминации  $R^2$ , или квадрат коэффициента множественной корреляции  $R^2 = SS_{рег} / SS_{общ}$

Как видно из уравнений регрессии, через 56 часов работы износ Т-ножей составил 4,3 мм, а Э-ножей – 3,0 мм. Через 64 часа работы износ Т-ножей – 5,0 мм, а Э-ножей – 3,4 мм. После 64 часов Т-ножи разрушились и работали только Э-ножи.

По программе «Регрессия» библиотеки «Анализ данных» табличного процессора MS Excel были рассчитаны статистические оценки коэффициентов уравнений (1) и (2) с 95% доверительным интервалом (стандартный режим) и с 99% доверительным интервалом.

Таблица 1. Износ Т-ножей от времени работы.

	Коэф фици нты	Станд артная ошибка	t- стати стика	P- Значен ие	Нижн ие 95%	Верхн ие 95%	Нижн ие 99%	Верхн ие 99%
У- перес ечени е	- 0,5457	0,0088	- 61,7824	1,16E- 46	- 0,5635	- 0,5280	- 0,5694	- 0,5220
Пере менн ая X	0,0873	0,0002	372,922 5	3,08E- 83	0,0868	0,0878	0,0867	0,0879

Таблица 2. Износ Э-ножей от времени работы.

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>	<i>Нижние 99%</i>	<i>Верхние 99%</i>
У-пересечение	-0,2031	0,0192	-10,5685	5,68E-17	-0,2413	-0,1648	-0,2537	-0,1524
Переменная X	0,0567	0,0004	156,3133	2,8E-103	0,0560	0,0574	0,0557	0,0577

В таблицах 1 и 2 графа «Стандартная ошибка» содержит выборочные стандартные отклонения по каждому коэффициенту уравнения регрессии. Если стандартная ошибка больше абсолютной величины коэффициента, это значит, что коэффициент рассчитан с большими погрешностями. В данном случае стандартные ошибки существенно меньше коэффициентов, что дало очень маленькие P-значения.

Вывод. Коэффициенты в уравнениях регрессии являются значимыми. Они мало изменятся, если мы построим новые уравнения регрессии по данным нового эксперимента.

Графы «Нижние 95%» и «Верхние 95%» содержат границы 95% доверительных интервалов, куда попадут коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  95 уравнений из 100: для Э-ножей: (0,0560; 0,0574), для Т-ножей: (0,0868; 0,0878).

Так как 95% доверительные интервалы не пересекаются, в 95 экспериментах из 100 коэффициент износа Э-ножей будет меньше, чем

коэффициент износа Т-ножей. Значения износа по часам работы приведены в таблице 3.

Таблица 3. Значения износа по часам работы.

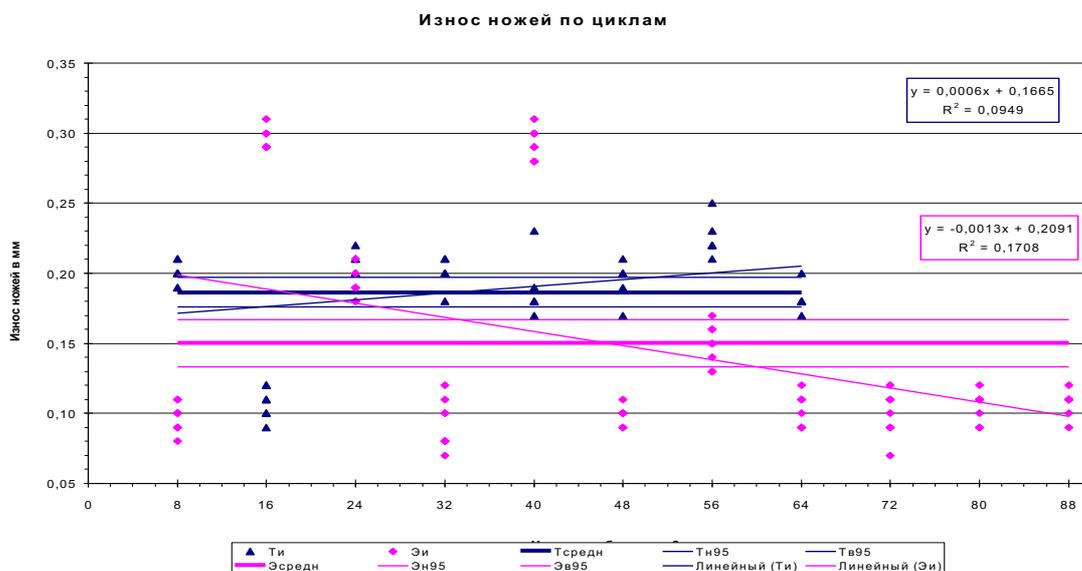
часы работы	16	24	32	40	48	56	64
Т-ножи мм	0,9	1,5	2,2	2,9	3,6	4,3	5,0
Э-ножи мм	0,7	1,2	1,6	2,1	2,5	3,0	3,4

### *Износ ножей по циклам*

Каждые 8 часов, измерялось укорачивание длины граней, ножи затачивались для нового 8-часового цикла работы, и опять измерялось укорачивание длины ножей. Для каждой точки 8-часового цикла было рассчитано укорачивание ножей в самом цикле: из укорачивания ножей до заточки вычиталось укорачивание ножей после заточки в предыдущем цикле. Была построена таблица укорачивания длины ножей за 8-часовые циклы. Всего получилось 8 циклов для Т-ножей, 49 значений, и 11 циклов для Э-ножей, 84 значения. Здесь удалены разрушенные ножи.

На рисунке представлена диаграмма износа ножей по циклам. Толстыми горизонтальными прямыми показаны средние значения износа ножей.

Для обоих типов ножей анализировался только средний износ по циклам.



Рисунок–1. Износ ножей по циклам

### Анализ износов через доверительные интервалы

Вычислим средний износ по циклам для каждого типа ножей.

Для Т-ножей: в выборке 49 значений и выборочный средний износ 0,187 мм.

Для Э-ножей: в выборке 84 значения и выборочный средний износ 0,150 мм.

То есть износ Э-ножей меньше на 19,5%, чем износ Т-ножей.

Для каждого выборочного среднего построим доверительный интервал

$$\left( \bar{x} - t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \leq a \leq \bar{x} + t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \right)$$

В этой формуле для каждого типа ножей будут свои значения:

$a$  – неизвестный генеральный износ;

$n$  – число значений в выборке;

$\bar{x}, s$  – выборочное среднее и выборочный стандарт отклонения;

$t=t(\alpha, n-1)$  – параметр Стьюдента, вычисляется функцией Excel;

$\alpha=1-\beta$  – уровень значимости;  $\beta$  – доверительная вероятность;

(для  $\beta=0,95$  будет уровень значимости  $\alpha=0,05$ )

$n-1$  – число степеней свободы.

Для  $\alpha=1-0,95=0,05$  были построены доверительные интервалы:

для Т-ножей (0,176; 0,197) и для Э-ножей (0,134; 0,167)

Так как интервалы не пересекаются, в 95 экспериментах из 100 износ Э-ножей будет меньше, чем Т-ножей.

Также были построены 99% доверительные интервалы,  $\alpha=1-0,99=0,01$ :

для Т-ножей (0,1725; 0,2005) и для Э-ножей (0,1281; 0,1724)

Доверительные интервалы приблизились друг к другу: 0,1724 и 0,1725 но еще не пересекаются. Можно утверждать, что в 99 экспериментах из 100 износ Э-ножей будет меньше, чем Т-ножей.

Какой же будет средний износ по циклам Т-ножей и Э-ножей.

С надежностью 95% средний износ Т-ножей будет от 0,176 до 0,197 мм.

С надежностью 95% средний износ Э-ножей будет от 0,134 до 0,167 мм.

### ***Анализ длины стружки и проницаемости измельченной массы***

Каждые 8 часов перед остановкой ЦСУ и в начале нового цикла работы измерялась длина стружки и проницаемость измельченной массы отдельно для обоих типов ножей. Длина стружки изменяется в пределах от 13 до 8 м, а проницаемость – от 190% до 83%. Чтобы оба параметра отобразить на одной диаграмме, введен новый параметр: проницаемость в % / 10.

### **Зависимость длины стружки от износа ножей**

Регрессионные уравнения зависимости длины стружки от износа ножей

$$y = -1,0131 \times x + 12,1572 \quad R^2 = 0,9694 \quad \text{для Т-ножей} \quad (3)$$

$$y = -0,9411 \times x + 12,6253 \quad R^2 = 0,9396 \quad \text{для Э-ножей} \quad (4)$$

Здесь  $y$  – длина стружки (в м),  $x$  – износ ножей (в мм),

Анализ таблиц 5 и 6 значений, рассчитанных программой «Регрессия» для уравнений (3) и (4), показал незначимость различий коэффициентов уравнений. То есть при одинаковом износе в мм Т-ножи и Э-ножи режут стружку одинаковой длины. Различия носят случайный характер.

Таблица 5. Длина стружки от износа Т-ножей.

	<i>Коэф фици нты</i>	<i>Станда ртная ошибка</i>	<i>t- статис тика</i>	<i>P- Значен ие</i>	<i>Нижни е 95%</i>	<i>Верхни е 95%</i>	<i>Нижни е 99%</i>	<i>Верхни е 99%</i>
У- перес ечени е	12,157 2	0,0743	163,670 1	1,92E- 66	12,007 7	12,306 6	11,957 7	12,356 6
Пере менна я X	- 1,0131	0,0262	- 38,5952	3,02E- 37	-1,0659	-0,9603	-1,0836	- 0,9426

Таблица 6. Длина стружки от износа Э-ножей.

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>	<i>Нижние 99%</i>	<i>Верхние 99%</i>
Y-пересечение	12,6253	0,0745	169,4095	3,9E-106	12,4771	12,7736	12,4288	12,8219
Переменная X	-0,9411	0,02634	-35,7047	9,77E-52	-0,99356	-0,8887	-1,0106	-0,8716

### **Зависимость проницаемости от износа ножей**

Регрессионные уравнения зависимости проницаемости от износа ножей

$$y = -2,4273 \times x + 20,3213 \quad R^2 = 0,9689 \quad \text{для Т-ножей} \quad (5)$$

$$y = -2,4029 \times x + 20,6590 \quad R^2 = 0,9599 \quad \text{для Э-ножей} \quad (6)$$

Здесь  $y$  – проницаемость (в % / 10),  $x$  – износ ножей (в мм),

Анализ таблиц 7 и 8 значений, рассчитанных программой «Регрессия» для уравнений (5) и (6), показал незначимость различий коэффициентов уравнений. То есть при одинаковом износе в мм Т-ножи и Э-ножи режут стружку одинаковой проницаемости. Различия носят случайный характер.

Таблица 7. Зависимость проницаемости от износа Т-ножей.

	<i>Коэф фици нты</i>	<i>Станд артная ошибка</i>	<i>t- стати стика</i>	<i>P- Значен ие</i>	<i>Нижн ие 95%</i>	<i>Верхн ие 95%</i>	<i>Нижн ие 70%</i>	<i>Верхн ие 70%</i>
У- перес ечени е	20,321 3	0,1796	113,163 8	6,27E- 59	19,960 0	20,682 5	20,133 1	20,509 5
Пере менн ая X	- 2,4273	0,0635	- 38,2492	4,56E- 37	- 2,5550	- 2,2997	- 2,4938	- 2,3608

Таблица 8. Зависимость проницаемости от износа Э-ножей.

	<i>Коэфф ициен ты</i>	<i>Станд артна я ошибк а</i>	<i>t- стати стика</i>	<i>P- Значен ие</i>	<i>Нижн ие 95%</i>	<i>Верхн ие 95%</i>	<i>Нижн ие 70%</i>	<i>Верхн ие 70%</i>
У- перес ечени е	20,659 0	0,1533	134,80 18	4,96E- 98	20,354 1	20,963 9	20,499 2	20,818 8
Пере менн ая X	-2,4029	0,0542	- 44,331 5	4,58E- 59	- 2,5108	- 2,2951	- 2,4595	- 2,3464

### ***Проницаемость массы по циклам***

На Рис. 4 представлена диаграмма изменения проницаемость массы по циклам работы ЦСУ для Т-ножей и Э-ножей. По исходным данным построены линии трендов 1-го порядка и 3-го порядка. Качество аппроксимации исходных точек, значения  $R^2$ , получились 0,97 и 0,99.

Линии тренда для Т-ножей явно ниже, чем для Э-ножей. Если мы покажем значимость коэффициентов регрессионных уравнений, то обоснуем больший выход сахара при работе с Э-ножами за счет увеличения проницаемости по циклам. Для этого нам нужно знать объем измельченной массы за каждые 8 часов и выход сахара в зависимости от проницаемости.

Кубическое регрессионное уравнение «проницаемость по циклам» имеет вид:  $p = a + b \times t + c \times t^2 + d \times t^3$ . Для каждого типа ножей – свои коэффициенты. Вычисление коэффициентов регрессионных уравнений по программе «Регрессия» выявило незначимость коэффициента  $b$  для обоих типов ножей. Так что регрессионные уравнения имеют вид:  $p = a + c \times t^2 + d \times t^3$

На Рис. 4 неполные кубические регрессионные уравнения (без линейного члена) помечены как Тпр\_ (зеленый) и Эпр\_ (оранжевый). Они немного отличаются от трендов 3-го порядка, и обе кубические кривые близки к регрессионным уравнениям 1-го порядка (толстые линии на диаграмме).

Для вычисления разности проницаемостей массы по циклам будем использовать регрессионные уравнения 1-го порядка:

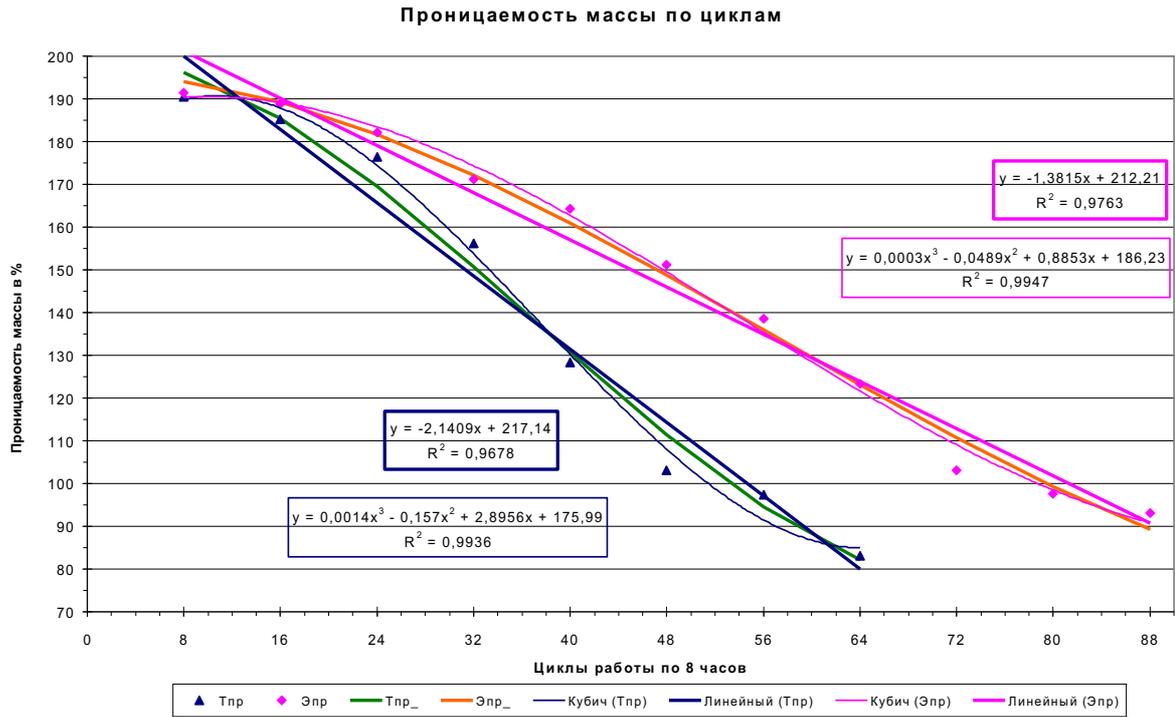
$$y = -2,1409 \times x + 217,14 \quad R^2 = 0,9678 \quad \text{для Т-ножей} \quad (7)$$

$$y = -1,3815 \times x + 212,21 \quad R^2 = 0,9763 \quad \text{для Э-ножей} \quad (8)$$

Здесь  $y$  – проницаемость (в %),  $x$  – время работы (в часах).

Например, при  $x=48$  час получается проницаемость массы:

для Т-ножей  $y=114,4\%$ , для Э-ножей  $y=145,9\%$ , разность 31,5%.



Рисунок–2. Проницаемость массы по циклам

Программа «Регрессия» вычисляет статистические таблицы «Регрессионная статистика», «Дисперсионный анализ» и «Коэффициенты». Из этих данных для каждого типа ножей нам нужна стандартная ошибка аппроксимации исходных точек  $s_e$  и таблица «Коэффициенты».

$$ss_e = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{n - 2}, \quad s_e = \sqrt{ss_e}$$

где  $y_i - \hat{y}_i$  отклонение исходной точки  $y_i$  от сглаженного значения  $\hat{y}$ , вычисленного по регрессионному уравнению.

Таблица 9. Проницаемость по циклам для Т-ножей  $s_e=8,269394$ .

Коэфф ициен ты	Станд артная ошибка	t- стати стика	P- Значен ие	Нижн ие 95%	Верхн ие 95%	Нижн ие 99%	Верхн ие 99%
----------------------	---------------------------	----------------------	--------------------	-------------------	--------------------	-------------------	--------------------

Продолжение таблицы 9

У- перес ечени е	217,13 57	6,44346	33,6986 2	4,55E- 08	201,36 91	232,90 23	193,24 71	241,024 4
Пере менн ая X	- 2,1409 2	0,15949 9	- 13,4228	1,06E- 05	- 2,5312	- 1,7506 4	- 2,7322 6	- 1,54959

Таблица 10. Проницаемость по циклам для Э-ножей  $s_e=6,015024$ .

	<i>Коэфф ициен ты</i>	<i>Станд артная ошибка</i>	<i>t- стати стика</i>	<i>P- Значен ие</i>	<i>Нижн ие 95%</i>	<i>Верхн ие 95%</i>	<i>Нижн ие 99%</i>	<i>Верхни е 99%</i>
У- перес ечени е	212,21 09	3,88973 4	54,5566 6	1,17E- 12	203,41 17	221,01 01	199,56 99	224,851 9
Пере менн ая X	- 1,3814 8	0,07168 9	- 19,2705	1,26E- 08	- 1,5436 5	- 1,2193 1	- 1,6144 5	- -1,1485

В этих таблицах в графе «*Коэффициенты*» – оценки коэффициентов уравнения регрессии, вычисленные по выборочным данным в одном эксперименте. Вычислим доверительную область для линии регрессии. При любом значении  $x$  соответствующие значения  $y$  распределены нормально. Средним является значение уравнения регрессии  $\hat{y}$  в точке  $x$ . Неопределённость его оценки характеризуется стандартной ошибкой регрессии:

$$s_{\hat{y}} = s_e \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}.$$

Из этой формулы видно, что минимальная стандартная ошибка регрессии будет в центре облака исходных точек (данных эксперимента), и она увеличивается при удалении от центра. Прогнозные значения за пределами экспериментальных данных будут содержать еще большую ошибку.

Таким образом, любое значение  $y$  из доверительного интервала с центром в точке  $\hat{y}$  и уровнем значимости  $\alpha$  удовлетворяет неравенству:

$$\hat{y} - t(\alpha, n-2) \times s_{\hat{y}} < y < \hat{y} + t(\alpha, n-2) \times s_{\hat{y}}$$

где  $\alpha = 0,05$  – уровень значимости;

$n-2$  – число степеней свободы,  $n$  – число значений  $y$  в точке  $x$ ;

$t(\alpha, n-2)$  –  $t$ -значение распределения Стьюдента (параметр Стьюдента);

$t(\alpha, n-2) \times s_{\hat{y}} = rad(\alpha, n-2, s_{\hat{y}})$  – радиус доверительного интервала.

Так как  $s_{\hat{y}}$  зависит от  $x$ , радиус доверительного интервала изменяется: минимальный – в центре облака исходных точек и увеличивается по краям.

Вычислить доверительный интервал – это значит вычислить нижнюю и верхнюю границу доверительного интервала:  $y_n = \hat{y} - rad$  и  $y_s = \hat{y} + rad$

Для каждого типа ножей вычислены доверительные интервалы проницаемости для значений уравнения регрессии в 11 точках окончания циклов: 8, 16, 24, 32, 40, 48, 56, 64, 72, 80, 88. Для Т-ножей есть только 8 точек: 8, 16, 24, 32, 40, 48, 56, 64. Остальные 3 точки 72, 80, 88 будут вычислены по уравнению регрессии как прогнозные значения.

Построим таблицу значений доверительных интервалов для уравнений регрессии (7) и (8).

Таблица 11. Доверительные интервалы проницаемости по циклам.

<i>x</i> час	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88
<i>Ty</i>	200,0	182,9	165,8	148,6	131,5	114,4	97,2	80,1	(63,0)	(45,9)	(28,7)
<i>Tr95</i>	13,1	10,6	8,6	7,3	7,3	8,6	10,6	13,1	15,8	18,6	21,5
<i>Tn95</i>	186,9	172,3	157,2	141,3	124,2	105,8	86,7	(67,1)	(47,2)	(27,3)	(7,2)
<i>Tv95</i>	213,1	193,5	174,3	155,9	138,8	122,9	107,8	93,2	(78,8)	(64,5)	(50,3)
<i>Ey</i>	201,2	190,1	179,1	168,0	157,0	145,9	134,8	123,8	112,7	101,7	90,6
<i>Er95</i>	7,7	6,6	5,7	4,9	4,3	4,1	4,3	4,9	5,7	6,6	7,7
<i>En95</i>	193,5	183,5	173,4	163,1	152,6	141,8	130,5	118,9	107,1	95,1	83,0
<i>Ev95</i>	208,8	196,7	184,7	172,9	161,3	150,0	139,2	128,7	118,4	108,3	98,3
<i>Э-Т н-95</i>	-19,6	-10,0	-0,9	7,2	13,8	18,9	22,7	25,8	27,1	15,1	3,0
<i>Э-Т</i>	1,2	7,2	13,3	19,4	25,5	31,5	37,6	43,7	32,7	21,7	10,6
<i>Э-Т в-95</i>	21,9	24,4	27,5	31,6	37,1	44,2	52,5	48,7	38,4	28,3	18,3

В этой таблице обозначено:

*x* час время остановки ЦСУ после 8-часового цикла работы

*Ty*–проницаемость в %, рассчитанная по регрессионному уравнению для Т-ножей (и ограниченная снизу пределом на уровне 80% проницаемости, ниже не рентабельно извлекать сахар)

*Tr95*–радиусы 95% доверительных интервалов в точках *x* для Т-ножей

*Tn95*–нижние границы 95% ... для Т-ножей, (предел 80%)

*Tv95*–верхние границы 95% ... Т-ножей, (предел 80%)

*Ey*–проницаемость в %, рассчитанная по регрессионному уравнению для Э-ножей

*Er95*–радиусы 95% доверительных интервалов в точках *x* для Э-ножей

*En95*–нижние границы 95% ... для Э-ножей

*Ev95*–верхние границы 95% ... Э-ножей

*Э-Т н-95*–в каждой точке *x* из нижней границы 95% доверительного

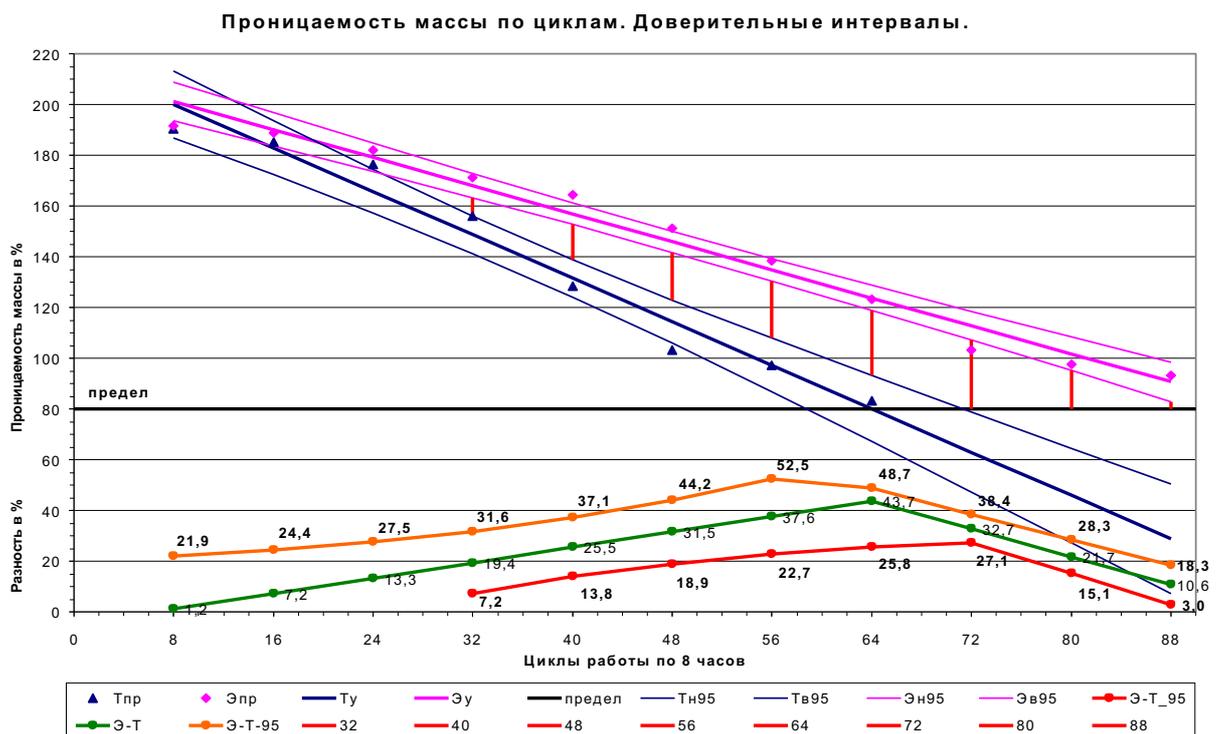
интервала для Э-ножей вычитаем верхнюю границу 95% доверительного интервала для Т-ножей, ограниченную снизу пределом 80%

Э-Т–в каждой точке  $x$  из значения регрессионного уравнения для Э-ножей вычитаем значение регрессионного уравнения для Т-ножей, ограниченную снизу пределом 80%

Э-Т в-95–в каждой точке  $x$  из верхней границы 95% доверительного интервала для Э-ножей вычитаем нижнюю границу 95% доверительного интервала для Т-ножей, ограниченную снизу пределом 80%

Можно утверждать, что в 95 экспериментах из 100 использование Э-ножей даст по циклам прибавку проницаемости.

В частности,, при  $x=48$  час использование Э-ножей дает прибавку проницаемости массы от 18,9% до 44,2%, а в среднем будет 31,5%.



Рисунок–3. Доверительные интервалы проницаемости по циклам

## Выводы

Статистический анализ данных эксперимента дал следующие результаты.

1. В течение 8-часового цикла работы ЦСУ средний износ составил:

для Т-ножей =0,187 мм; для Э-ножей =0,150 мм

то есть износ Э-ножей на 19,5% меньше, чем износ Т-ножей.

Этот результат обоснован на уровне значимости 0,05 и 0,01 (95% и 99% доверительная вероятность) построением непересекающихся доверительных интервалов

для Т-ножей (0,176; 0,197) мм (0,173; 0,201) мм

для Э-ножей (0,134; 0,167) мм (0,128; 0,172) мм

и проверкой гипотезы «Двухвыборочный  $t$ -тест с различными дисперсиями».

В результате через 64 часа испытаний с заточкой ножей после 8 часовых циклов средний износ составил:

для Т-ножей 5,0 мм

для Э-ножей 3,5 мм

2. Использование Э-ножей вместо Т-ножей дает увеличение проницаемости измельченной массы, то есть прибавку выхода сахара. По 8-часовым циклам прибавка составляет от 0,1 до 0,5 (цикл 64) от проницаемости массы, измельченной Т-ножами.

С учетом построенных доверительных интервалов, в 95 случаях из 100 увеличение проницаемости в цикле 64 будет не меньше, чем 0,3 и не больше чем 0,6 от проницаемости массы, измельченной Т-ножами.

Большинство значений увеличения проницаемости будет сконцентрировано вокруг значений ряда данных Э-Т, строка в таблице 11. Сумма значений по циклам 8-88 составляет 244%, а это больше, чем дополнительный 8-часовой цикл работы установки.

Данные микрометрических исследований деформации заготовок в штамповой оснастке

При исследовании технологического процесса изготовления ножей в штамповой оснастке использовалась заготовка из стали 40\*13, размеры и форма которых обоснованы расчетным методом, (таблица 3, раздел 2 диссертации)

№ п.п.	Проверяемые параметры деформационной заготовки			
	Ширина привалочной плоскости 45 мм по чертежу	Длина режущих граней, 48 мм по чертежу	Толщина стенок режущих граней, мм	Угол граней ромбических поверхностей, град.
1	45 во всех образцах обеспечивается стабильно за счет установочных на штифты штампа 2 отверстий в заготовки	49,34	2,86	75 Во всех образцах обеспечивается стабильно за счет конструкции матрицы и пуансона штампа
2		49,62	2,44	
3		50,03	2,56	
4		50,04	2,74	
5		49,83	2,76	
6		49,88	2,91	
7		49,92	3,02	
8		49,87	2,77	
9		49,88	3,04	
10		49,85	3,02	
11		49,83	3,02	
12		49,52	2,76	
13		49,63	2,83	
14		50,01	3,02	
15		49,73	2,81	
16		49,82	3,01	
17		50,04	3,01	
18		49,75	2,73	
19		49,79	2,82	
20		50,02	2,76	

### Данные исследований выносливости на изгиб свеклорезных ножей

Исследование свеклорезных ножей по параметру выносливости на изгиб велись на модернизированной вибрационной установке ВУ 5/5000 по схеме и методике, представленных в подразделе 3.6 диссертации в соответствии с ГОСТ 25.504-82

Показатели выносливости на изгиб			
Ножи, традиционной конструкции и технологии		Ножи, изготовленные по экспериментальной конструкции и технологии	
Время испытаний, час	Число циклов нагружений, $R \cdot 10^6$	Время испытаний, час	Число циклов нагружений, $R \cdot 10^6$
24	2,85	24	4,21
48	4,91	48	6,16
72	6,53	72	6,89
96	6,92	96	8,37
120	7,48	120	9,39
144	8,11	144	10,38

- 1.5 Осуществляет авторский надзор при производстве опытной партии свеклорезных ножей.
2. ООО «Водоавтоматика»
  - 2.1 Выделяет прессовое и металлорежущее оборудование для монтажа оснастки, предназначенной для изготовления свеклорезных ножей;
  - 2.2 Совместно с сотрудниками кафедры ПАПП выполняет работы, запланированные в п.п. 1.4 и 1.5 настоящего договора;
  - 2.3 Изготавливает опытную партию свеклорезных ножей.

Ответственные от

СГАУ им. Н. И. Вавилова

Заведующий кафедрой ПАПП

д. т. н., профессор

к.т.н., доцент

Аспирант



Рудик Ф. Я.

Скрябина Л.Ю.

Ковылин П. А.

Утверждаю:

Генеральный директор

ООО «Водоавтоматика»



*С. А. Халов*  
С. А. Халов

«5» августа 2013

О научно-техническом сотрудничестве ООО «Водоавтоматика» и кафедры «Процессы и аппараты пищевых производств» ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова»

С целью апробации результатов научно-исследовательской работы «Повышение эксплуатационной надежности ножей центробежных свеклорезных установок», выполненной сотрудниками кафедры ПАПП СГАУ им. Н.И. Вавилова и рассмотрения в последующем возможности внедрения ее результатов для промышленного выпуска ножей свеклорезных новой конструкции на производственных площадях ООО «Водоавтоматика», договаривающиеся стороны принимают на себя следующие обязательства:

1. Кафедра ПАПП СГАУ им. Н. И. Вавилова
  - 1.1 Передает конструкторско – технологическую документацию на изготовление свеклорезных ножей с повышенными показателями надежности и ресурсосбережения по новой технологии (патент на полезную модель №13042 от 08.02.2013г.);
  - 1.2 Передает конструкторско-технологическую документацию на штамповую и фрезерную оснастку для изготовления свеклорезных ножей;
  - 1.3 Передает опытно-конструкторские образцы оборудования для штамповки и механической обработки свеклорезных ножей;
  - 1.4 Совместно с сотрудниками ООО «Водоавтоматика» осуществляет пуско-наладочные работы оборудования и оснастки для изготовления свеклорезных ножей;

- 1.5 Осуществляет авторский надзор при производстве опытной партии свеклорезных ножей.
2. ООО «Водоавтоматика»
  - 2.1 Выделяет прессовое и металлорежущее оборудование для монтажа оснастки, предназначенной для изготовления свеклорезных ножей;
  - 2.2 Совместно с сотрудниками кафедры ПАПП выполняет работы, запланированные в п.п. 1.4 и 1.5 настоящего договора;
  - 2.3 Изготавливает опытную партию свеклорезных ножей.

Ответственные от

СГАУ им. Н. И. Вавилова

Заведующий кафедрой ПАПП

д. т. н., профессор

к.т.н., доцент

Аспирант



Рудик Ф. Я.

Скрябина Л.Ю.

Ковылин П. А.

Утверждаю:

Генеральный директор

ОАО «Балашовский сахарный комбинат»



А. В. Волотич  
«12» октября 2013 года

### Протокол

Согласования научно-исследовательских работ по направлению «Совершенствование технологии измельчения сахарной свеклы в центробежной установке».

С целью содействия проведению научно-исследовательских работ, направленных на совершенствование технологического процесса переработки сахарной свеклы, ОАО «Балашовский сахарный комбинат» принимает на себя следующие обязательства:

- предоставить возможность проведению производственных ресурсных испытаний свеклорезных ножей новой упрочненной конструкции, изготовленных методом пластической деформации на кафедре «Процессы и аппараты пищевых производств» СГАУ им. Н. И. Вавилова;

- допустить к обследованию технического состояния ножей в период их эксплуатации научного сотрудника кафедры;

- по результатам исследований составить совместный акт производственных испытаний.

Кафедра ПАПП СГАУ им. Н. И. Вавилова обязуется:

- своевременно поставить к производственным испытаниям экспериментальные ножи с гарантированными показателями безопасности и СанПиН требованиями;

- научному сотруднику во время проведения производственных испытаний соблюдать все предусмотренные на комбинате правила техники безопасности и режима работы предприятия;

- подготовить и согласовать с сотрудниками ОАО «Балашовский сахарный комбинат» акт производственных испытаний свеклорезных ножей новой конструкции.

Срок действия договора о совместной научно-исследовательской работе установить период с октября 2013 года по ноябрь 2014 года.

Ответственные от

СГАУ им. Н. И. Вавилова

Заведующий кафедрой ПАПП

д. т. н., профессор

к.т.н., доцент

Аспирант



Рудик Ф. Я.



Скрябина Л.Ю.



Ковылин П. А.

Утверждаю:

Генеральный директор

ООО «Водоавтоматика»

*С.А. Халов*

«7» октября 2013

Акт



Производственных испытаний технологического процесса с комплектом оснастки для изготовления свеклорезных ножей с повышенными показателями износостойкости и усталостной прочности.

На основании договора о научно-техническом сотрудничестве ООО «Водоавтоматика» с кафедрой ПАПП СГАУ им. Н. И. Вавилова комиссия в составе:

- Представители ООО «Водоавтоматика»

1. ген. директор: Халов А.А. *С.А. Халов*

2. инженер: Лысенко С.Г. *С.Г. Лысенко*

- представители СГАУ им. Н. И. Вавилова

1. Скрыбина Л.Ю. –к.т.н., доцент

2. Ковылин А. П. – аспиранта *А.П. Ковылин*

Провела производственную проверку технологического процесса с комплектом оснастки для изготовления свеклорезных ножей.

1) Цель испытаний:

Изготовление свеклорезных ножей по технологии и на оснастке, представленной кафедрой ПАПП СГАУ им. Н. И. Вавилова

2) Объект испытаний:

Технологический процесс и опытно-конструкторская оснастка для изготовления ножей свеклорезных;

3) Технологические режимы деформации заготовки устанавливались и оптимизировались исходя из расчетных показателей в интервалах: температура нагрева 800-1100<sup>0</sup>С, усилие деформации 1150-400 кН скорость деформирования 0,0017-0,00064 м/с.

Результаты испытаний сведены в таблицу

Таблица – Экспериментальная оптимизация режимов пластической деформации.

№ п.п.	Температура преддеформационного нагрева, °С	Усилие деформации, кН	Скорость деформирования, м/с	Качество формообразования
1	800	1150	0,0017	Не до конца сформирован раздел привалочной и режущей плоскостей, не выдержана ромбическая форма граней
2	850	1150	0,0028	Раздел плоскостей сформирован, более качественное образование ромбической формы граней
3	900	1100	0,0021	Формообразование качественное, ромбовидная форма граней соблюдена
4	950	980	0,0018	Формообразование качественное, ромбовидная форма граней соблюдена
5	1000	750	0,00085	Формообразование качественное, ромбовидная форма граней соблюдена
6	1050	530	0,00075	Формообразование качественное, ромбовидная форма граней соблюдена
7	1100	400	0,00064	Формообразование качественное, ромбовидная форма граней соблюдена

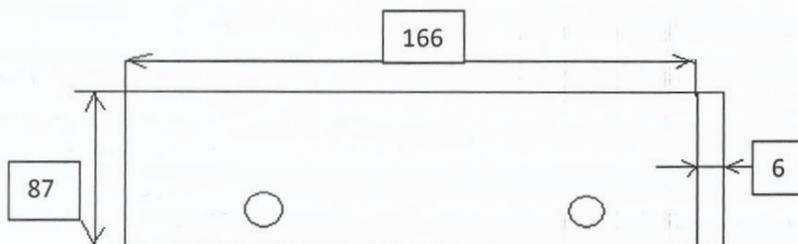
Исходя из данных экспериментальных исследований следует сделать вывод о целесообразности формообразования ножа в интервале температур равном 950-1050<sup>0</sup>С. Деформация при пониженных температурах ведет к низкому качеству формообразования режущих граней, к снижению скорости деформирования и прочностных показателей оснастки. Повышенная же температура не дает никаких технических преимуществ и воздействует разупрочняюще на структуру металла свеклорезных ножей.

В методику и последовательность испытаний входило:

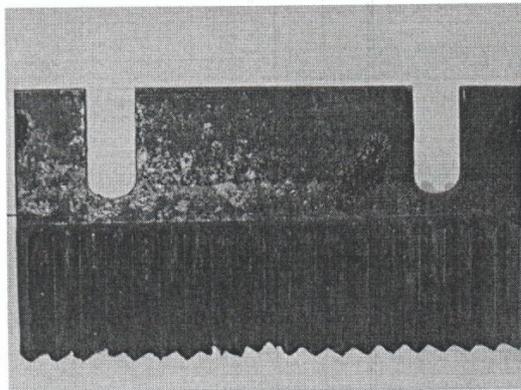
- определение работоспособности штамповой оснастки в холостом режиме;
- получение заготовки с профилем граней ножей и минимальными припусками для механической обработки;
- исследование и установление оптимальных технологических режимов для пластической деформации поковок и обоснование их рациональных геометрических параметров при обеспечении качества классных поверхностей;
- механическая обработка и закалка полученных поковок;
- контролируемые параметры: технологические режимы; геометрические размеры поковки; режущие грани и кромки ножа.

Результаты испытаний:

1. Штамповая оснастка смонтирована на гидравлическом прессе ДБ – 2436 АВ с усилием 4000 кН, ход траверсы в холостом режиме обеспечивает полное соприкосновение и взаимодействие граней матрицы и пуансона;
2. В соответствии с расчетами к деформации подготовлены заготовки из стали 40Х13 с размерами и массой 0,64кг.



3. В результате производственных испытаний получен штампованный образец с сформированными режущими гранями и с размерами полностью соответствующим заданным



4. Механическая обработка режущих граней осуществлялась на вертикально-фрезерном станке мод.676 посредством универсальной фрезерной головки, представленной СГАУ им. Н. И. Вавилова, обработкой режущих граней 1 и привалочных установочных пазов 2. Полученная геометрическая форма режущих граней и их размеры полностью соответствуют конструктивным требованиям



На основании данных производственных испытаний комиссия считает:

1. Опытно-конструкторская действующая модель оснастки для производства свеклорезных ножей новой конструкции с повышенными показателями износостойкости, усталостной прочности и ресурсосбережения полностью соответствует своему функциональному назначению;

2. Оптимальными технологическими режимами установлены:

- температура преддеформационного нагрева 950-1050<sup>0</sup>С;
- усилие деформации – 750-550 кН;
- скорость деформирования -0,00085 -0,0075 м/с.

Экспериментальными исследованиями штамповой оснастки установлены показатели производственных характеристик:

- 1) Производительность штамповой оснастки, мин-8;
- 2) Длительность обработки зубьев, мин:
  - механической обработкой заготовки -30;
  - штампованных заготовок -10.
- 3) Экономия металла, % -150...270;
- 4) Экономия электроэнергии, %-50.

3. По своим функционально- параметрическим показателям технология штамповая и обрабатывающая оснастки соответствуют назначению производству свеклорезных ножей с высокими показателями износостойкости, усталостной прочности и ресурсосбережения. Технология и оснастка высокопроизводительны, изготовление ножей может иметь высокую экономическую эффективность;

4. С целью установления показателей работоспособности ножей новой конструкции считается необходимым проведение эксплуатационных испытаний на сахарном производстве и при наличии положительных результатов возможно рассмотрение вопроса о внедрении результатов исследования в производство.

Члены комиссии:

 С.Г. Лысенко

Л.Ю. Скрябина

 А.П. Ковылин



# ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 130542

## СВЕКЛОРЕЗНЫЙ НОЖ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013105418

Приоритет полезной модели 08 февраля 2013 г.

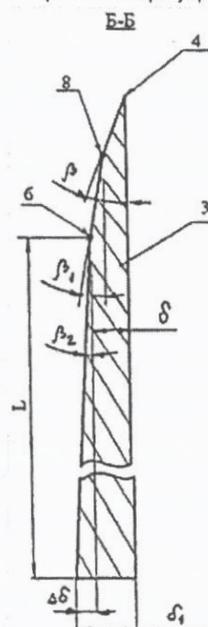
Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 27 июля 2013 г.

Срок действия патента истекает 08 февраля 2023 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Б.П. Симонов*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ  ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ, ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ <b>ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ</b> Статус: по данным на 17.10.2013 - действует Пошлина:	
(19) <b>RU</b> (11) <b>130542</b> (13) <b>U1</b> (51) МПК <b>B26D1/00</b> (2006.01)	
(22) Заявка: 2013105418/02, 08.02.2013 Дата начала отсчета срока действия патента: <b>08.02.2013</b> Приоритет(ы): Дата подачи заявки: 08.02.2013 Опубликовано: 27.07.2013 Адрес для переписки: 420022, г.Саратов, Театральная пл., 1, Саратовский государственный аграрный университет имени Е.И. Вавилова, патентный отдел	(72) Автор(ы): Рудик Феликс Яковлевич (RU), Богатырев Сергей Аркадьевич (RU), Ковылин Анатолий Петрович (RU), Скрябина Лариса Юрьевна (RU), Гумарова Алина Кариковна (KZ), Булеков Тулеген Ахметович (KZ) (73) Патентообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова" (RU)
<b>СВЕКЛОРЕЗНЫЙ НОЖ</b> Формула полезной модели Свеклорезный нож, содержащий крепежную часть и рабочую часть, состоящую из зигзагообразно расположенных перьев с основным и дополнительным углом их заострения и режущей кромкой, при этом основной угол заострения каждого пера составляет 8-10°, а дополнительный - 4-5° с вершиной, расположенной на расстоянии 1,5-2 толщины пера от края режущей кромки, режущая кромка имеет основной и дополнительный углы наклона, причем дополнительный угол наклона режущей кромки выполнен на расстоянии 1,5-2 толщины пера от его вершины равным 60°, отличающийся тем, что каждое перо выполнено с углом наклона 2-3°, вершина которого находится на краю острия пера с дополнительным углом заострения, при этом угол наклона пера направлен в сторону границы рабочей и крепежной частей, а толщина пера имеет равномерное приращение по длине.	
	

## СВЕКЛОРЕЗНЫЙ НОЖ

Предлагаемая полезная модель относится к сахарной промышленности и может быть использована для изрезывания одревесневшей паренхимной ткани корнеплодов сахарной свеклы в стружку.

Ближайшим техническим решением к предлагаемому является свекло-резный нож, содержащий крепежную часть и рабочую часть, состоящую из зигзагообразно расположенных перьев с основным и дополнительным углами их заострения и режущей кромкой, имеющей угол наклона. При этом режущая кромка на расстоянии 1,5-2 толщины пера от его вершины выполнена с дополнительным углом наклона, равным  $50-60^{\circ}$ , основной угол заострения каждого пера составляет  $8-10^{\circ}$ , а дополнительный -  $4-5^{\circ}$ , причем его вершина расположена на расстоянии 1,5-2 толщины пера от края режущей кромки (прототип - авторское свидетельство №612959, С13С1/08. Опубл. 30.06.1978. Бюл. №24).

Однако возможности длительного использования данного свеклорезного ножа для получения стружки со стабильными размерами и заданной формой ограничены низкой прочностью его режущей рабочей части.

Техническим результатом полезной модели является повышение усталостной прочности ножа и обеспечение качества стружки.

Технический результат достигается тем, что свеклорезный нож содержит крепежную часть и рабочую часть, состоящую из зигзагообразно расположенных перьев с основным и дополнительным углом их заострения и режущей кромкой, при этом основной угол заострения каждого пера составляет  $8-10^{\circ}$ , а дополнительный -  $4-5^{\circ}$  с вершиной, расположенной на расстоянии 1,5-2 толщины пера от края режущей кромки, кроме того, режущая кромка имеет основной и дополнительный углы наклона, причем дополнительный угол наклона режущей кромки выполнен на расстоянии 1,5-2 толщины пера от его вершины, равным  $50-60^{\circ}$ , в котором согласно полезной модели каждое

перо выполнено с углом наклона  $2-3^{\circ}$ , вершина которого находится на краю участка пера с дополнительным углом заострения, при этом угол наклона пера направлен в сторону границы рабочей и крепежной частей, а толщина пера имеет равномерное приращение по длине.

На фиг.1 схематично изображен свеклорезный нож, вид сбоку; на фиг.2 - вид по стрелке А на фиг.1; на фиг.3 - разрез Б-Б на фиг.2.

На фигурах обозначены:

- крепежная часть - 1;
- рабочая часть - 2;
- зигзагообразно расположенное перо - 3;
- вершина зигзагообразно расположенного пера - 4;
- режущая кромка - 5;
- край - 6 участка пера с дополнительным углом заострения;
- граница рабочей и крепежной частей - 7;
- основной угол заострения зигзагообразно расположенного пера -  $\beta$ ;
- вершина - 8 дополнительного угла заострения зигзагообразно расположенного пера -  $\beta_1$ ;
- основной угол наклона режущей кромки -  $\alpha$ ;
- дополнительный угол наклона режущей кромки -  $\alpha_1$ ;
- угол наклона пера -  $\beta_2$ ;
- толщина пера -  $\delta$ ;
- максимальное значение толщины пера -  $\delta_1$ ;
- длина -  $L$  участка пера с приращением толщины -  $\Delta\delta$ .

Свеклорезный нож содержит крепежную часть 1 и рабочую часть 2, состоящую из зигзагообразно расположенных перьев 3 с основным  $\beta$  и дополнительным углом  $\beta_1$  их заострения и режущей кромкой 5, при этом основной угол заострения каждого пера составляет  $8-10^{\circ}$ , а дополнительный -  $4-5^{\circ}$  с вершиной 8, расположенной на расстоянии 1,5-2 толщины пера от края 4 режущей кромки 5, кроме того, режущая кромка 5 имеет основной  $\alpha$  и дополнительный  $\alpha_1$  углы наклона, причем дополнительный угол наклона режущей

кромки выполнен на расстоянии 1,5-2 толщины пера от его вершины, равным  $50-60^\circ$ . Каждое перо выполнено с углом наклона  $2-3^\circ$ , вершина которого находится на краю 6 участка пера с дополнительным углом заострения  $\beta_1$ , при этом угол наклона  $\beta_2$  пера направлен в сторону границы 7 рабочей и крепежной частей, а толщина  $\delta$  пера имеет равномерное приращение  $\Delta\delta=\delta_1-\delta$  по длине  $L$  с максимальным значением  $\delta_1$ , равным 1,2-1,5 мм.

Свеклорезный нож работает следующим образом.

После закрепления крепежной части 1 ножа и включения свеклорезки свекла и нож приводятся в относительное движение по отношению друг к другу. Масса корней волокнистой сахарной свеклы подается на режущую кромку 5 ножа. При этом благодаря наличию углов наклона  $\alpha$  и  $\alpha_1$  режущей кромки 5, а также углов заострения  $\beta$ ,  $\beta_1$  и угла наклона  $\beta_2$  перьев 3, создаются условия для внедрения ножа в свеклу и изрезывания одревесневшей паренхимной ткани корнеплодов сахарной свеклы в стружку заданной ширины и толщины перьями 3.

Для восстановления режущих кромок 5 и заострения перьев 3, затупленных в процессе изрезывания свеклы в стружку, производится периодическая заточка до заданной шероховатости рабочей части 2 ножа под углами наклона  $\alpha$  и  $\alpha_1$  и углами заострения  $\beta$  и  $\beta_1$ .

Благодаря наличию дополнительного угла наклона  $\beta_2$ , обеспечивающего приращение  $\Delta\delta$  толщины перьев 3 у основания на границе 7 рабочей части 2 ножа до  $\delta_1=1,2-1,5$  мм, усталостная прочность ножа повышается в 2-3 раза. Время работы предлагаемого свеклорезного ножа до замены увеличивается в 1,7-1,8 раза по сравнению с серийно изготовленным безреберным ножом №1011 для центробежной установки Т2М-СЦ2Б-12.

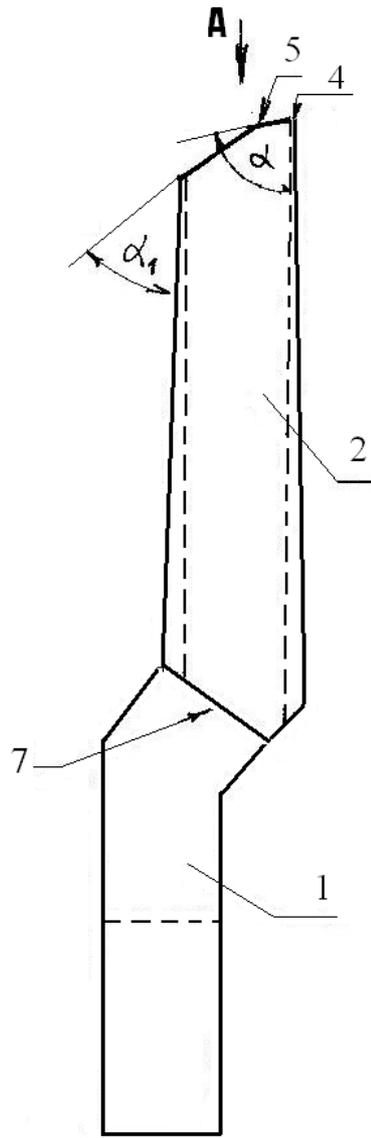
Таким образом, применение предлагаемого свеклорезного ножа позволит достичь следующих результатов.

1. Наличие переменного по длине дополнительного утолщения режущих перьев у основания рабочей части ножа, испытывающего воздействие значи-

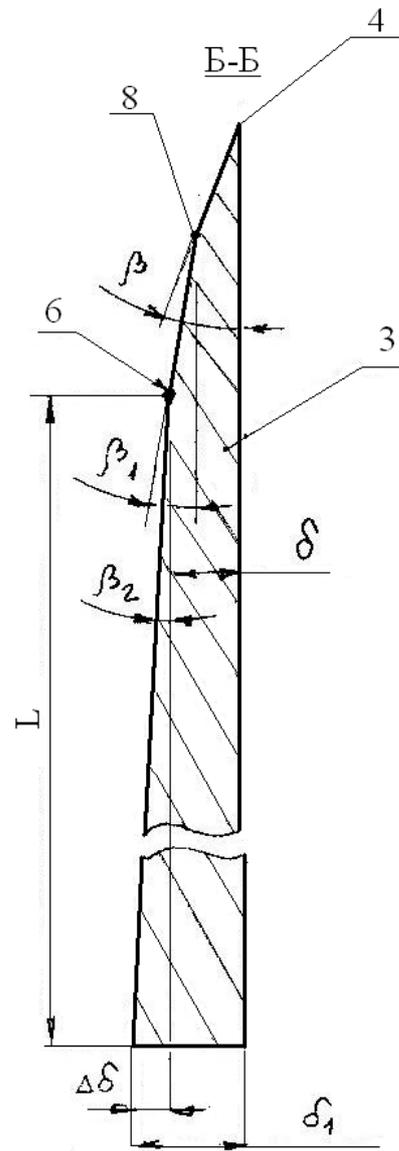
тельных переменных нагрузок, позволяет повысить усталостную прочность ножа и увеличить срок его службы.

2. Наличие дополнительного запаса прочности ножа позволяет использовать его без возникновения риска поломки для получения качественной стружки со стабильными размерами и заданной формой из корнеплодов сахарной свеклы с плотной одревесневшей паренхимной тканью и засоренных посторонними растительными примесями.

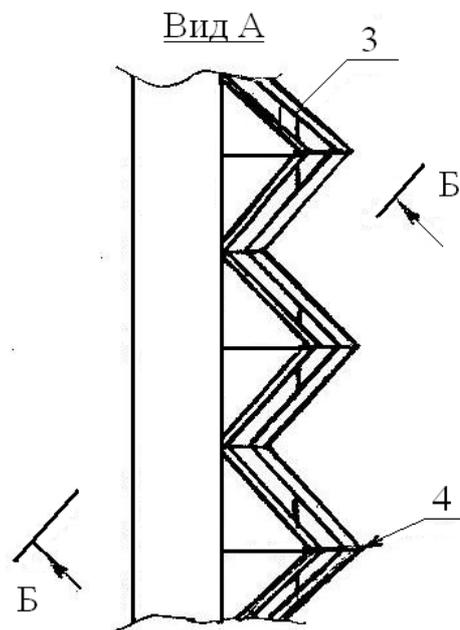
## СВЕКЛОРЕЗНЫЙ НОЖ



Фиг. 1



Фиг. 3



Фиг. 2

Утверждаю:

Генеральный директор

ОАО «Балашовский сахарный комбинат»



Болотич А. В.

«12» ноября 2014г.

Акт

Производственных испытаний ножей для измельчения сахарной свеклы  
в центробежных свеклорезных установках

На основании договора научно-исследовательской работе ОАО «Балашовский сахарный комбинат» и ФГБОУ «Саратовский аграрный университет им. Н. И. Вавилова» от 12 октября 2013 на тему: «Повышение эффективности измельчения сахарной свеклы упрочненными ножами усовершенствованной конструкции». Для проведения производственных испытаний создана комиссия в составе:

1. инженер: Колесников В.И. 

2. гл. механик: Швецов А.А. 

- от ОАО «Балашовский сахарный комбинат»

- ФГБОУ «Саратовский аграрный университет им. Н. И. Вавилова».

к.т.н., доцент Скрыбина Л.Ю. , аспирант Ковылин А. П. –кафедра «Процессы и аппараты пищевых производств».

В качестве объекта исследования приняты:

- ножи свеклорезные экспериментальные новой конструкции с повышенными показателями износостойкости и усталостной прочности, разработанные в СГАУ им. Н. И. Вавилова, из стали УОХ13;

- ножи свеклорезные традиционные, соответствующие ТУ 3-7501003-27-94, изготовленные механической обработкой из стали У7;

- показатели качества свеклорезной стружки при измельчении свеклы в центробежной свеклорезной установке.

#### Цель испытаний:

- установление показателей эксплуатационной надежности экспериментальных свеклорезных ножей, сравнение показателей результатов испытаний с данными ножей, изготовленных по традиционной технологии;

- провести анализ качества свекловичной стружки, произведенной с использованием экспериментальных и традиционных ножей.

#### Методика исследований:

- с целью создания идентичных условий испытаний центробежная свеклорезная установка должна укомплектоваться двухножевыми рамками с ножами по схеме: 1,3,5,7,9 – рамки с традиционными ножами и 2,4,6,8 – рамки с экспериментальными ножами;

- контроль технического состояния ножей осуществлять в соответствии с регламентом, установленным на предприятии;

- контроль размеров и режущих граней ножей ежемесячно во время проведения технического обслуживания оборудования;

- контроль качества свекловичной стружки ежемесячно в установленные периоды времени, соответствующие остановке установки на ежемесячное техническое обслуживание;

- контроль технического состояния ножей и качества свекловичной стружки вести до достижения ножами предельного состояния.

#### Результаты испытаний

Сравнительными эксплуатационными испытаниями ножей, изготовленных по традиционной и экспериментальной технологиям, установлены основные технические состояния режущих граней и кромок, характеризующих:

- износостойкость и усталостную прочность, обуславливающих свойства безотказности, долговечности и ремонтпригодности ножей;

- функциональные и параметрические параметры, устанавливающие соответствие объектов исследования к измельчению сахарной свеклы в соответствии с нормативными требованиями.

Таблица – Результаты производственных испытаний

Порядковые № ножей	Время испытаний, час	Контролируемые параметры			Примечания
		Величина износа длины режущей грани, мм	Качество стружки, м/100 навески г	Проницаемость, % <i>к/ч</i>	
1Т 3Т 5Т 7Т 9Т	24	0,65 0,64 0,73 0,69 0,62	14,8 14,7 14,8 14,6 14,7	180,0	
2Э 4Э 6Э 8Э	24	0,42 0,44 0,51 0,49	15,7 15,9 15,6 15,7	195,4	
1Т 3Т 5Т 7Т 9Т	48	1,95 1,90 разрушение 1,93 2,00	12,9 12,9 режущей 12,8 12,9	154,2 границы	брак
2Э 4Э 6Э 8Э	72	1,25 1,31 1,33 1,28	15,2 15,1 15,1 15,3	170,8	
1Т 3Т 5Т 7Т 9Т	72	2,43 разрушение 2,53 разрушение 2,64	8,5 режущей 8,7 режущей 8,6	102,3 границы границы	брак брак
2Э 4Э 6Э 8Э	72	1,85 1,73 1,68 1,71	13,6 13,6 13,7 13,7	140,8	

5Т	96	3,71	5,8	граней	брак
7Т		разрушение	режущих		
9Т		3,68	5,9		
2Э	96	разрушение	режущих	граней	брак
4Э		2,44	11,9		
6Э		2,48	11,8		
8Э		2,46	12,2		
1Т	120	разрушение	режущих	граней	брак
3Т		разрушение	режущих		
5Т		4,55	4,2		
7Т		разрушение	режущих		
9Т		4,53	4,3		
2Э	120	разрушение	режущих	граней	брак
4Э		2,53	10,7		
6Э		2,52	10,5		
8Э		2,47	10,6		
				90	работоспос. работоспос. работоспос.

СГАУ им .Н.И. Вавилова

ОАО «Балашовский сахарный комбинат»

к.т.н., доцент Скрыбина Л.Ю.

инженер Колесников В.И.

аспирант Ковылин А.П.

гл.механик Швецев А.А.



# ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 150113

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014116686

Приоритет полезной модели 24 апреля 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 23 декабря 2014 г.

Срок действия патента истекает 24 апреля 2024 г.

Врио руководителя Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



Автор(ы): *Рудик Феликс Яковлевич (RU), Богатырев Сергей Аркадьевич (RU), Ковылин Анатолий Петрович (RU), Попова Анастасия Васильевна (RU), Морозов Алексей Алексеевич (RU)*

KU 150113 U1



ВЗН 7/10 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2014116686/02, 24.04.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
24.04.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 24.04.2014

(45) Опубликовано: 27.01.2015 Бюл. № 3

Адрес для переписки:

410012, г. Саратов, Театральная пл., 1, ФГБОУ  
ВПО "Саратовский государственный аграрный  
университет имени Н.И. Вавилова", патентный  
отдел

(72) Автор(ы):

Рудик Феликс Яковлевич (RU),  
Богатырев Сергей Аркадьевич (RU),  
Ковылин Анатолий Петрович (RU),  
Попова Анастасия Васильевна (RU),  
Морозов Алексей Алексеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
"Саратовский государственный аграрный  
университет имени Н.И. Вавилова" (RU)

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

(57) Формула полезной модели

Устройство для изготовления режущих инструментов, содержащее валки с деформирующими поверхностями, отличающееся тем, что деформирующие поверхности валков выполнены комбинированными с гладкой дугообразной поверхностью и зигзагообразным рельефом, разделенными асимметричными скошенными в сторону направления вращения валков ступенями, при этом деформирующие поверхности валков с зигзагообразным рельефом выполнены со смещением центра дуг их окружностей относительно центра вращения валков.

КУ 150113 U1



В21Н 7/10 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2014116686/02, 24.04.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
24.04.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 24.04.2014

(45) Опубликовано: 27.01.2015 Бюл. № 3

Адрес для переписки:

410012, г. Саратов, Театральная пл., 1, ФГБОУ  
ВПО "Саратовский государственный аграрный  
университет имени Н.И. Вавилова", патентный  
отдел

(72) Автор(ы):

Рудик Феликс Яковлевич (RU),  
Богатырев Сергей Аркадьевич (RU),  
Ковылин Анатолий Петрович (RU),  
Попова Анастасия Васильевна (RU),  
Морозов Алексей Алексеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

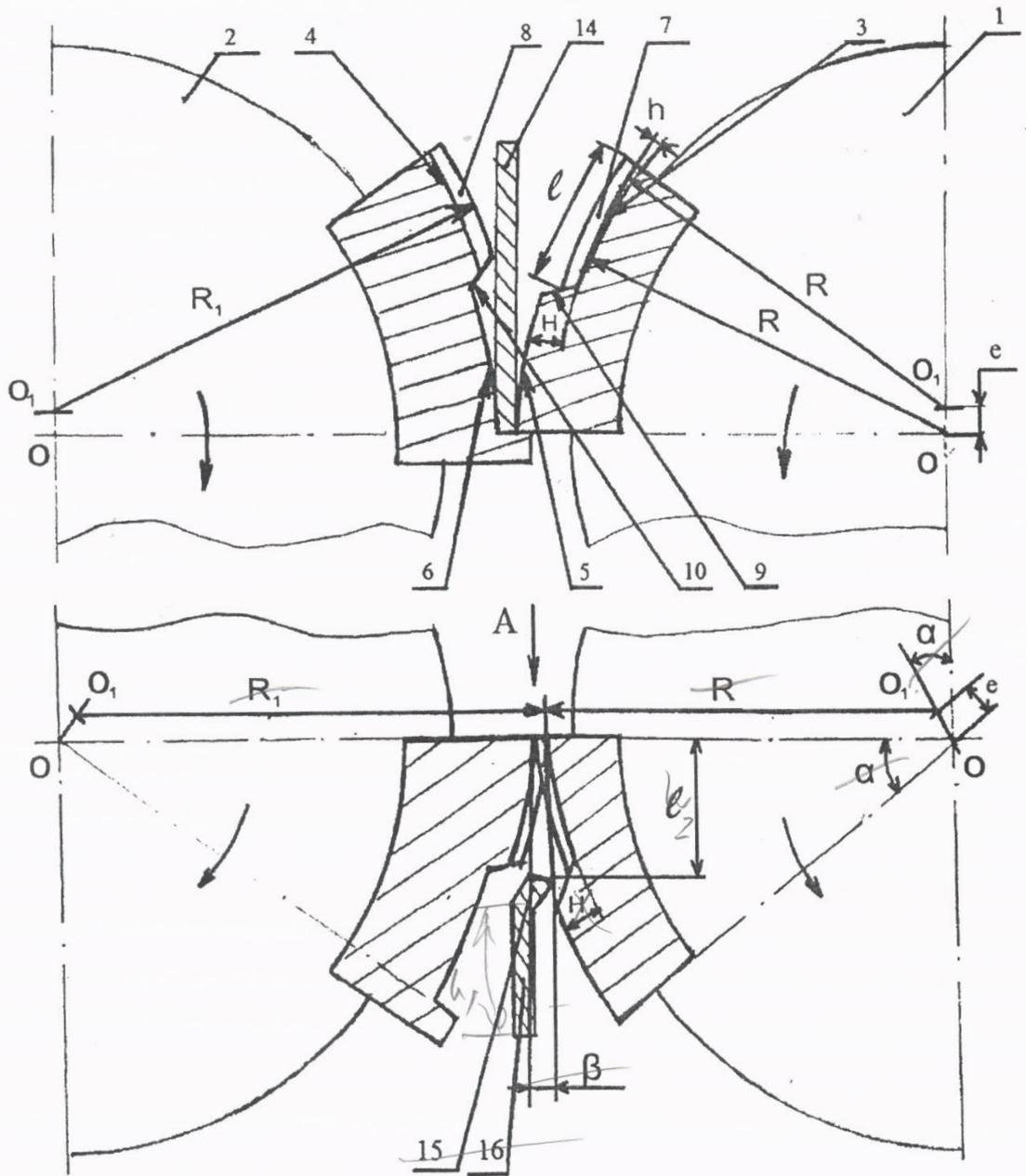
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
"Саратовский государственный аграрный  
университет имени Н.И. Вавилова" (RU)

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

(57) Формула полезной модели

Устройство для изготовления режущих инструментов, содержащее валки с деформирующими поверхностями, отличающееся тем, что деформирующие поверхности валков выполнены комбинированными с гладкой дугообразной поверхностью и зигзагообразным рельефом, разделенными асимметричными скошенными в сторону направления вращения валков ступенями, при этом деформирующие поверхности валков с зигзагообразным рельефом выполнены со смещением центра дуг их окружностей относительно центра вращения валков.

КУ 150113 У 1



RU 150775 U I