



УДК 664.1:621.9



DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-4-58-64

Повышение износостойкости и прочности на изгиб ножей к центробежным свеклорезкам

Феликс Яковлевич Рудик¹,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: rudik.sgau@mail.ru;

Сергей Алексеевич Бредихин²,
доктор технических наук

¹Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова, г. Саратов, Российская Федерация;

²Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

Реферат. Эффективность производства сахара во многом зависит от состояния свекловичной стружки, полученной при измельчении сахарной свеклы в центробежной свеклорезке. Показали, что уже к концу односменной наработки дефектное состояние ножей ведет к недобору до 28-30 процентов сахарозы. (*Цель исследования*) Установить качественные показатели свекловичной стружки, измельченной в центробежной свеклорезке, усовершенствовать конструкцию и технологию изготовления ножей с повышенными физико-механическими характеристиками. (*Материалы и методы*) Выявили причины, ухудшающие параметры ножей и качество измельчения сахарной свеклы в режущем аппарате. Для повышения прочности и износостойкости на изгиб режущих граней ножа усовершенствовали конструкцию ножа и предложили новую технологию его изготовления. Теоретически и экспериментально обосновали целесообразность замены технологии изготовления режущих граней резанием на обработку пластической деформацией в штамповой оснастке. (*Результаты и обсуждение*) Определили механизм и последствия изнашивания и поломки режущих кромок, деформации и поломки режущих граней ножей для измельчения сахарной свеклы. Усовершенствовали технологию штамповки граней в специальной оснастке. Разработали и экспериментально проверили в производственных условиях конструкцию оснастки для штамповки и механической обработки режущих граней ножа. (*Выводы*) Предложили упрочняющие методы обработки режущих граней ножей штамповкой. Решили вопросы конструктивного обеспечения технологии изготовления ножей специальной высокопроизводительной и ресурсосберегающей оснасткой. Экспериментально определили и проверили в условиях эксплуатации основные физико-механические показатели ножей для измельчения сахарной свеклы, изготовленных по традиционной и экспериментальной технологиям. Показали преимущества режущих граней ножей для измельчения сахарной свеклы, сделанных по усовершенствованной технологии: увеличение микротвердости на 14 процентов и повышение выносливости на изгиб на 30 процентов.

Ключевые слова: переработка сахарной свеклы, стружка сахарной свеклы, центробежная свеклорезка, режущая кромка, износостойкость ножей в центробежной свеклорезке.

■ **Для цитирования:** Рудик Ф.Я., Бредихин С.А. Повышение износостойкости и прочности на изгиб ножей к центробежным свеклорезкам // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №4. С. 58-64. DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-4-58-64.

Improving the Wear Resistance and Bending Strength of Knives Used in Centrifugal Beet Cutters

Feliks Ya. Rudik¹,
Dr.Sc.(Eng.), professor, e-mail: rudik.sgau@mail.ru;

Sergey A. Bredikhin²,
Dr.Sc.(Eng.), professor

¹Saratov State Vavilov Agrarian University, Saratov, Russian Federation;

²Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Abstract. The efficiency of sugar production depends largely on the state of beet chips obtained from a centrifugal sugar beet cutter. It is shown that a one-shift operation of defective knives may result in a loss of up to 28-30 percent of sucrose. (*Research purpose*) To establish quality indicators of beet chips obtained from a centrifugal beet cutter, to improve a design and production technology of knives with increased physical and mechanical characteristics. (*Materials and methods*) The authors identified the reasons leading to the deterioration of the knife parameters and ensuring the quality of sugar beet cutting. To increase the indicators of wear resistance and bending strength of the cutting edges, the knife design was modified and a new technology of knife manufacturing was offered. The authors theoretically and experimentally proved the feasibility of replacing the manufacturing technology of the cutting edges of



knives - from cutting to plastic deformation in die tooling. (*Results and discussion*) The authors have determined the mechanism and consequences of the wear and breakage of cutting points and the deformation and breakage of cutting edges of sugar beet knives. The technology of edge die stamping with special equipment was offered. The design of tooling for die stamping and machining of knife's cutting edges was developed and experimentally tested in production conditions. (*Conclusions*) The authors offered the methods of strengthening cutting edges of knives with die casting, as well as offered solutions to the design problems of knife manufacturing using special high-performance and resource-saving equipment. The main physical and mechanical characteristics of sugar beet knives manufactured according to conventional and improved technologies have been experimentally determined and tested under operating conditions. The authors show the advantages of the cutting edges of sugar beet knives manufactured according to the improved technology; the study has proved an increase in microhardness by 14 percent and an increase in bending strength by 30 percent.

Keywords: sugar beet processing, sugar beet chips, centrifugal sugar beet cutter, cutting edge, wear resistance of knives in a centrifugal sugar beet cutter.

For citation: Rudik F.Ya., Bredikhin S.A. Povysheniye iznosostoykosti i prochnosti na izgib nozhey k tsentrobezhnym sveklorezkam [Improving the wear resistance and bending strength of knives used in centrifugal beet cutters]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N4. 58-64 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-4-58-64.

Для получения максимального выхода сахара при переработке сахарной свеклы необходимо качественное, технологически обоснованное измельчение [1, 2]. Для этого в центробежной свеклорезке предусмотрен нож специальной конструкции. Ромбовидная форма и размеры стружки способствуют максимальному выходу свекловичного сока из вакуолей корнеплода в диффузионном аппарате. Чем выше качество измельчения, тем больше сахарозы извлекается из стружки [3, 4].

Качество измельчения $K_{с.с.}$ функционально обусловлено технологическим состоянием свеклы, поступающей из кагатов в разные периоды года и с различной степенью ее загрязненности, условиями выращивания и уборки корнеплодов $T_{с.с.}$, конструктивно-технологическим состоянием ножей для ее измельчения $K_{с.н.}$ и показателем безотказности ножа $P_n(t)$ [5, 6]:

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

Непосредственно при измельчении на качество стружки могут воздействовать лишь конструктивно-технологические показатели ножа для измельчения стружки $K_{с.н.}$ и безотказности $P_n(t)$, которая зависит от износостойкости и выносливости материала лезвия на изгиб. После окончания каждой смены режущие кромки ножа затачивают, что в целом обеспечивает его высокую работоспособность до проведения очередного технического обслуживания.

Качество стружки зависит от технического состояния ножа и оценивается показателем проницаемости стружки. Установлено, что оптимальная проницаемость наблюдается при длине стружки 11-14 м, приходящейся на 100 г навески (рис. 1).

При длине стружки 11-14 м в 100 г навески проницаемость стружки составляет около 170 л/ч (рис. 1). Это эквивалентно потере сахарозы при ее дальнейшем извлечении в диффузионном аппарате до 2-5%, что допустимо. Однако по мере работы центробежной свекло-

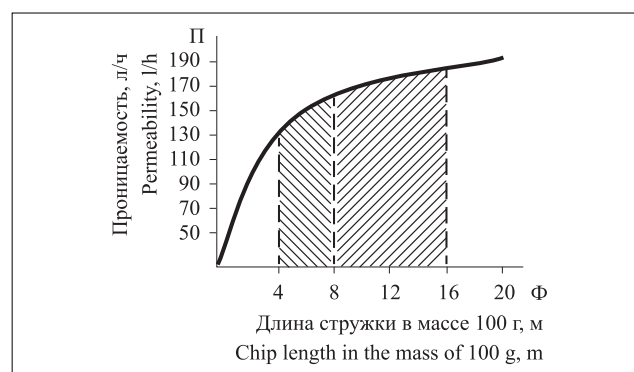


Рис. 1. Зависимость проницаемости стружки от ее длины
Fig. 1. The dependence of the permeability shavings and its length

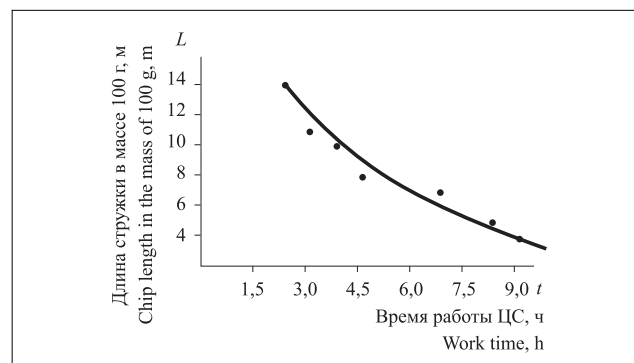


Рис. 2. Зависимость длины стружки от времени работы центробежной свеклорезки
Fig. 2. The dependence of the chip length on the operating time of the centrifugal beet cutter

резки идет интенсивный процесс изнашивания и затупления режущих кромок граней ножа, грани деформируются, что изменяет характер измельчения сахарной свеклы. Процесс резания ткани затупленным инструментом встречает значительное противодействие со стороны упругой деформации свеклы. Это вызывает соответствующее изменение толщины стружки, которая не должна превышать 0,0005 м. Изнашивание режущих кромок идет по нарастающей, что влечет за со-

бой идентичное ухудшение параметров стружки (рис. 2). К концу смены длина стружки укорачивается до 8-10 м, соответственно на 20-22% ухудшается ее проницаемость, достигая показателя 90-120 л/ч. Потери сахарозы доходят до 30%. При исследовании работы режущего аппарата центробежной установки анализом видов, последствий и критичности их отказов установлено, что элементом, не подлежащим дальнейшему разукрупнению и обеспечивающим качественное измельчение сахарной свеклы, являются режущие грани ножа [7, 8]. Для оценки влияния отказа ножа на качество функционирования центробежной свеклорезки и полноту выполнения ею назначенных функций исследовали возможный материальный ущерб, обусловленный невыполнением им определенных заданных функций.

Качество стружки в первую очередь зависит от технического состояния свеклорезного ножа. Считаем, что эффективность измельчения можно оценить интегральным показателем качества. В данном случае конструктивно-технологическое состояние ножа оценивали зависимостью суммарного положительного эффекта работы центробежной установки от затрат на создание нового ножа и его технического обслуживания при эксплуатации:

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

где I – интегральный показатель качества, руб.;

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

α – поправочный коэффициент, зависящий от срока службы оборудования;

Z_c – затраты на создание нового ножа, руб.;

Z_s – затраты на техническое обслуживание нового ножа, руб.

Цель исследования – установить зависимость качественных показателей свекловичной стружки, измельченной в центробежной свеклорезке, усовершенствовать конструкцию и технологию изготовления ножей с повышенными физико-механическими характеристиками.

Материалы и методы. Для реализации цели исследования использовали данные анализа рабочего процесса измельчения сахарной свеклы в стружку. Особенность биологического строения сахарной свеклы с расположенными в продольном направлении вакуолями, заполненными свекловичным соком, вызывает определенные сложности их измельчения [1]. Необходимо тщательное измельчение вакуолей с окружающими их оболочками паренхимной ткани. С этой целью установили и исследовали технологически рациональные параметры стружки: толщину стружки (в пределах 0,0005 м) и длину стружки на 100 г навески.

Микрометражными исследованиями определяли величину износа и деформации формы граней в период односменной наработки. Для оценки механизма по-

вышения износостойкости и упрочнения граней ножа изучили микро- и макроструктурное состояние, физические показатели (остаточные напряжения и плотность дислокаций), выносливость на изгиб и износостойкость изделий, выполненных по экспериментальной технологии. Результаты обрабатывали с помощью программы *MS Excel* из пакета *Microsoft Office*.

Результаты и обсуждение. При анализе дефектного состояния ножей для измельчения сахарной свеклы в стружку установили, что их работоспособность связана с систематическими и внезапными отказами. Жесткие условия работы при измельчении сахарной свеклы заключаются в многократных ударных и инерционных взаимодействиях корнеплода и режущего аппарата, создаваемых центробежными силами от вращения волчка в неподвижном цилиндре свеклорезки с закрепленными в нем ножевыми рамками. Изнашивание ножей ухудшает параметры стружки [9].

Систематические отказы возникают от знакопеременных ударных нагрузок каждой очередной свеклы о грани ножа и вызваны образованием усталостных трещин, деформацией граней и их поломкой [10]. Инерционное перемещение и измельчение свеклы по режущим кромкам граней ножа создают условия для гидроабразивного изнашивания. Внезапные отказы связаны с попаданием в емкость центробежной свеклорезки инородных материалов (камней, комков замерзшей земли, замерзших корнеплодов и прочего); они вызывают невосстанавливаемые локальные разрушения режущих граней ножа (рис. 3). При работе центробежной установки проверка технического состояния ножей и их замена невозможны; их осуществляют только в пустой емкости после окончания смены, так как каждая непредусмотренная остановка отрицательно воздействует на ритм предприятия. Но возникает отрицательная производственная ситуация, когда некачественное измельчение ведет к недоизвлечению из вакуолей до 30% свекловичного сока. А это влечет за собой значительные потери вырабатываемого продукта и повышает его себестоимость.

Силовой анализ измельчения свеклы позволил установить зависимость между процессом резания и техническим состоянием ножа по технологическим параметрам свекловичной стружки [11-13]. От длины контакта свеклы с режущими гранями ножа зависят длина и толщина стружки, при этом анализируемые параметры зависят также от силы преодоления изгиба стружки и напряжения сжатия свеклы [14]:

$$N_\beta = \frac{1}{2} [\sigma_{сж}] LB, \quad (3)$$

где N_β – сила преодоления изгиба свекловичной стружки, Н;

$\sigma_{сж}$ – напряжение сжатия свеклы, МПа;

L – длина стружки, м;

B – толщина стружки, м.

Чтобы улучшить качество стружки, прежде всего



Рис. 3. Дефектное состояние режущих граней ножей: а – изношенная режущая кромка; б – разрушенная режущая кромка; с – деформированные с локальными поломками режущие грани

Fig. 3. Defective condition of the cutting edges of knives: a – worn cutting edge; b – destroyed cutting edge; c – deformed cutting edges with local defects

необходимо повысить износостойкость режущих граней ножа. Единичная грань имеет ромбовидный профиль (рис. 4).

Площадь сечения стружки определим выражением:

$$S_c = \frac{c}{2} \left(a_1 \cos \frac{\alpha}{2} + 2H_1 \sin \frac{\alpha}{2} - 2c^2 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right), \quad (4)$$

где c – толщина стенки, м;

a_1 – шаг грани с учетом толщины стенки, м;

a_2 – длина внутренней полости грани, м;

H_1 – высота грани, м;

H_2 – высота полости грани, м.

Момент инерции, учитывающий конструктивные особенности ромбовидной грани, равен:

$$J_{x_1} = \frac{a_1 H_1^3}{12} - \frac{a_2 H_2^3}{12} - S_c, \quad (5)$$

где J_{x_1} – момент инерции, Н·м;

S_c – площадь сечения стружки, м².

После подстановки известных конструктивных па-

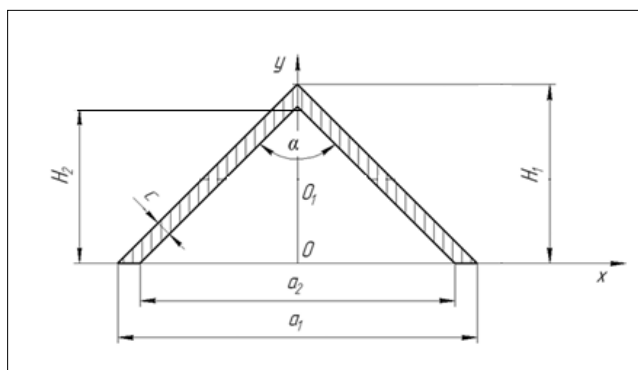


Рис. 4. Сечение режущей грани ножа

Fig. 4. Cross-section of the cutting edge of a knife

раметров получим уравнение момента инерции при прохождении свеклы сквозь грани ножа:

$$J = \frac{a_1 H_1^3}{12} - \frac{\left(a_1 - 2c \sin \frac{\alpha}{2} \right) \left(H_1 - c \cos \frac{\alpha}{2} \right)}{12} - \frac{H_1^2 c}{9} \left(a_1 \sin \frac{\alpha}{2} + 2H_1 \sin \frac{\alpha}{2} - 2c \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} \right). \quad (6)$$

Полученный момент инерции оказывает существенное воздействие на напряжения $\sigma_{нар}$, воспринимаемые режущими гранями при измельчении свеклы:

$$\sigma_{нар} = -\frac{P_y L}{3J} - \frac{P_x L_t}{S}, \quad (7)$$

где $\sigma_{тр}$ – напряжения, приходящиеся на контактирующую со свеклой граней ножа, МПа;

P_x – сила, действующая по направлению резания свеклы, Н;

P_y – сила, противодействующая процессу резания свеклы, Н;

J – момент инерции на перемещение свеклы относительно режущих граней ножа, Н·м.

В свою очередь, сила реакции на внедрение режущих кромок граней ножа в свеклу определяется выражением:

$$N_x = \pi R [\sigma_{сж}] \frac{2H_1}{\cos \frac{\alpha}{2}}, \quad (8)$$

где N_x – сила реакции на внедрение свеклы в режущие грани ножа, Н;

R – нормальная составляющая сила, Н;

$\sigma_{сж}$ – напряжение сжатия свеклы, МПа.

Теоретический анализ рабочего процесса измельчения сахарной свеклы в центробежной свеклорезке позволил установить силовые характеристики, обуславливающие:

- инерционное перемещение корнеплода относительно режущих кромок граней ножа;

- ударные воздействия корнеплодов на грани ножа, конструктивно находящиеся в свободном состоянии, связанные с центробежными силами, возникающими от раскрученных улиткой центробежной установки корнеплодов свеклы.

Отказы ножа характеризуются не потерей его работоспособности, а достаточно интенсивным изменением качества стружки. Затупление режущих кромок при эксплуатации центробежной свеклорезки в течение смены ухудшает параметры стружки, сопровождается снижением показателя проницаемости стружки и, соответственно, сахарозы от 2,5% в начале смены до 28-30% в конце. Отказы устраняются путем перезаточки режущих кромок ножей после каждой смены. Из-за укорачивания длины режущих граней и изменения по этой причине рабочего процесса измельчения возможно проводить не более 4-5 перезаточек, после чего ножи выбраковывают. На этом основании

с целью упрочнения режущих кромок и граней ножа мы предложили изменить технологию его изготовления. Формирование режущих граней по принятой технологии фрезерования создает однородную по строению структуру ромбовидной грани с низкими показателями износостойкости и коэффициента использования материала. Замена обработки материала резанием на пластическую деформацию позволит методами объемного и поверхностного деформирования упрочнить и повысить как износостойкость режущих граней, так и их выносливость на изгиб.

Исходя из ранее проведенных исследований принято решение повысить прочностные и износостойкие показатели путем формирования режущих граней методом пластической деформации в специальной штамповой оснастке [15-19]. Для формирования качественных граней с минимальными припусками на механическую обработку исследовали схему формообразования (рис. 5). Процесс формирования граней в штамповой оснастке исследовали, определяя нормальные усилия деформации по элементу грани методом линий скольжения. Возникающие при этом на элементах штампа максимальные касательные напряжения τ создают первую линию скольжения k по направлению AB , $\tau = k$. В точках их соприкосновения она направлена по касательной и пересекает матрицу штампа под углом $\varphi = \pi/2$. Эти линии скольжения формируют боковые поверхности режущих граней и их пики. А линии скольжения второго семейства AC и BD – боковые стенки и впадины. Тогда нормальные напряжения сдвига σ_n можно выразить следующим образом:

$$\sigma_n = 2k(1+\varphi), \quad (9)$$

где σ_n – нормальные напряжения сдвига, МПа;

φ – угол поворота линий скольжения от точки A до точки B , град.

В соответствии с принятым конструктивным решением формообразующие плоскости матрицы и пуансона взаимно параллельны, то есть:

$$\sigma_n = 2k(1+\pi/2). \quad (10)$$

$$\text{При тангенциальном сдвиге } k = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s,$$

где σ_s – напряжение текучести материала ножа, Па, тогда нормальные напряжения сдвига будут равны:

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \left(1 + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{-2}{\sqrt{3}} \times \\ &\times 2,57 \sigma_s = -1,155 \times \\ &\times 2,57 \sigma_s = -2,87 \sigma_s, \end{aligned} \quad (11)$$

Напряжение деформации в поперечном сечении вычисляем по формуле:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \sigma_n \sin \frac{\alpha}{2}, \text{ поэтому усилие деформации для формирования режущих граней ножа равно:} \\ P_1 &= 2,87 \sigma_s \sin(\alpha/2) S n, \end{aligned} \quad (12)$$

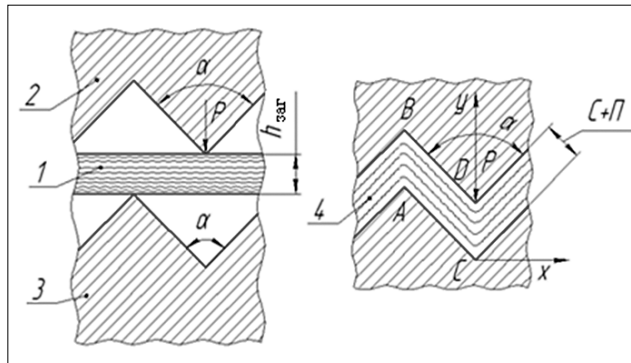


Рис. 5. Схема формообразования режущих граней ножей при штамповке: 1 – деформируемая пластина; 2 – пуансон штампа; 3 – матрица штампа; 4 – сформированные в штамповой оснастке режущие грани ножа; $C+\Pi$ – толщина стенки грани ножа с припуском на механическую обработку

Fig. 5. Scheme of the cutting edge formation of knives when stamping: 1 – deformable plate; 2 – stamp punch; 3 – stamp matrix; 4 – knife edges formed in die tooling; $C+\Pi$ – the thickness of a knife edge wall with a machining allowance

где P_1 – усилие деформации для формирования режущих граней ножа, Н;

S – площадь поперечного сечения одного сектора пуансона, м²;

n – количество элементов граней ножа, шт.

Штамповая оснастка состоит из формообразующих матрицы и пуансона с деформирующими гранями, обеспечивающими получение заданных формы и размера граней ножа с незначительными припусками на финишную операцию механической обработки (рис. 6). Заготовка ножа выполнена из проката толщиной 6 мм, что исключает в последующем необходимость механической обработки его привалочной крепежной плоскости. При изготовлении ножей механической обработкой используют заготовки толщиной 13 мм, что в 2 раза повышает расход металла по сравнению со штамповкой (рис. 6). Это объясняется тем, что при производстве ножей механической обработкой принимается заготовка толщиной 14 мм, а при использовании методов пластической деформации – толщиной 8 мм. Заготовку устанавливают в матрицу штампа, на два штифта, что предохраняет ее от сдвигов при одновременной деформации и формообразовании внутренней и внешней полостей режущих граней взаимодействием матрицы и пуансона. Для стабильности формообразования граней предусмотрены также две пары колонн и втулок. Стойкость деформирующих граней матрицы и пуансона по отношению избыточному давлению обеспечивается срабатыванием пружинного механизма штампа.

Финишная механическая доводка осуществляется многофрезерной оправкой, одновременно обрабатывающей внутреннюю и внешнюю поверхности режущих граней в два перехода.

Принятая для изготовления свеклорезных ножей

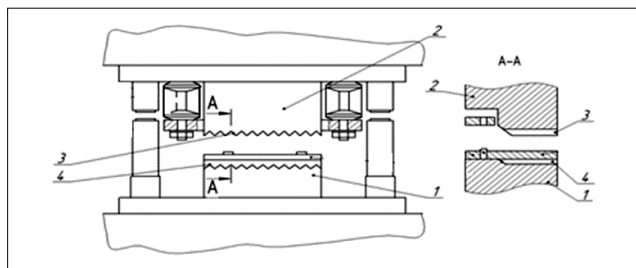


Рис. 6. Штамп для формообразования поволоков ножей:
1 – матрица; 2 – пуансон; 3, 4 – деформирующие грани
Fig. 6. Stamp for shaping knife forgings:
1 – matrix; 2 – punch; 3, 4 – deforming edges

инструментальная сталь У7 технологически не оправдана, она предназначена для производства простого инструмента, не воспринимающего значительные ударные и инерционные нагрузки. Она обладает высокой твердостью, склонна к хрупкости и выкрашиванию режущей кромки, характеризуется низким пределом выносливости на изгиб при симметричном цикле нагружения. Для изготовления свеклорезных ножей больше подходит хорошо зарекомендовавшая се-

бя сталь 40X13, обладающая пластичностью к действиям ударных нагрузок, а также высокой износо- и коррозионностойкостью, что немаловажно для пищевой индустрии.

Выводы. Определили механизм и последствия изнашивания и выкрашивания режущих кромок, деформаций и поломок режущих граней ножей для измельчения сахарной свеклы. Усовершенствовали конструкцию ножа путем упрочнения высоты и дна режущих граней и разработали новые технологии и оснастку для изготовления специальной упрочняющей высокопроизводительной и ресурсосберегающей оснасткой. Экспериментально определили и проверили в условиях эксплуатации основные физико-механические показатели ножей для измельчения сахарной свеклы, изготовленных по традиционной и экспериментальной технологиям. Показали повышение микротвердости на 14% и выносливости на изгиб на 30% режущих граней ножей для измельчения сахарной свеклы, изготовленных по усовершенствованной технологии.

Физико-механические и структурные показатели режущих граней свеклорезных ножей												
PHYSICAL-AND-MECHANICAL AND STRUCTURAL INDICATORS OF THE CUTTING EDGES OF BEET KNIVES												
Технологии Technologies	Микротвердость, МПа Microhardness, MPa			Выносливость на изгиб, циклы нагрузки Bending strength, load cycles		Остаточные напряжения, МПа Residual stresses, MPa			Плотность дислокаций, 10^{11} cm^{-2} Dislocation density, 10^{11} cm^{-2}			Структурное состояние материала режущих граней Structural state of the material of cutting edges
	глубина сечения, $\text{m} \cdot 10^{-3}$ cross-section depth, $\text{m} \cdot 10^{-3}$			время испытания, ч test time, h		глубина сечения, $\text{m} \cdot 10^{-3}$ cross-section depth, $\text{m} \cdot 10^{-3}$			глубина сечения, $\text{m} \cdot 10^{-3}$ cross-section depth, $\text{m} \cdot 10^{-3}$			
	1,0	0,5	1,0	72	144	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	
Традиционная Conventional	500	500	500	6,5	8,0	-127	-9,3	-10	1,4	1,4	1,4	грубоигольчатый мартенсит coarse needle martensite
Экспериментальная Improved (experimental)	570	550	570	7,3	10,5	-67,2	-55,1	-67,2	9,6	8,7	9,6	скрытокристаллический мартенсит с карбидами хрома cryptocrystalline martensite with chromium carbides

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Сахарная свекла – качество корнеплодов и выход сахара / Под редакцией Н.П. Вострухина. Минск: Юнипак. 2007. 206 с.
- Сахарная свекла / Под редакцией Д. Шпаара. Минск: Невада. 2000. 166 с.
- McGinnis R.A. Beet-Sugar Technology. 2nd Edition. New York: Reinhold Publishing Corporation. 1971. 574.
- Азрилович М.Я. Технологическое оборудование свеклосахарных заводов. М.: Агропромиздат. 1986. 320 с.
- Сапронов А.Р. Технология сахарного производства. М.: Колос. 1999. 495 с.
- Рудик Ф.Я., Богатырев С.А. Анализ условий работы и износа режущих кромок ножей центробежных установок // *Аграрный научный журнал*. 2018. N3. С. 47-50.
- Рудик Ф.Я., Скрябина Л.Ю., Ковылин А.П. Дефектное состояние ножей к центробежным установкам и повышение их усталостной прочности // *Ремонт, восстановление, модернизация*. 2014. N8. С. 22-26.
- Рудик Ф.Я., Скрябина Л.Ю., Ковылин А.П. Обеспечение показателей надежности ножей для измельчения сахарной свеклы // *Научное обозрение*. 2012. N6. С. 160-163.
- Проектирование, конструирование и расчет техники пищевых технологий / Под редакцией В.А. Панфилова. СПб.,

Краснодар: Лань. 2013. 911 с.

10. Гребенюк С.М., Щербачков С.М. Исследование силовых взаимодействий сахарной свеклы с барабаном свеклорезки // *Сахарная промышленность*. 1981. N2. С. 22-25.

11. Джента Дж., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Накопление кинетической энергии. М.: Мир. 1988. 248 с.

12. Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин. М.: Машиностроение. 1979. 702 с.

13. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. М.: Высшая школа. 1980. 400 с.

14. Беляев Н.М. Сопrotивление материалов. М.: Альянс С. 2014. 608 с.

15. Rudik F.Ya., Gutuev M.Ch., Vorotnikov I.L. New in Manufacturing and Restoration of Meat-Processing Machines

Cutting Tool. *Journal of Huazhong Agricultural University*. 2000. Vol. 19. N3. 292-296.

16. Рудик Ф.Я. Совершенствование технологических процессов изготовления и восстановления режущего инструмента оборудования перерабатывающей отрасли. М.: Росинформагротех. 2000. 182 с.

17. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение. 1977. 423 с.

18. Лопухин А.М., Гунн Г.Я., Галкин Ф.М. Сопrotивление пластической деформации металлов. М.: Металлургия. 1983. 352 с.

19. Годжаев З.А., Гришин А.П., Гришин А.А., Гришин В.А. Ключевые технологии и прогноз развития сельскохозяйственной робототехники // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2016. N6 (21). С. 35-41.

REFERENCES

1. Sakharnaya svekla – kachestvo korneplodov i vykhod sakhara [Sugar beet - the quality of root crops and sugar yield] / Ed. by N.P. Vostrukhin. Minsk: Yunipak. 2007. 206. (In Russian)

2. Sakharnaya svekla [Sugar beet] / Ed. by D. Shpaar. Minsk: Nevada. 2000. 166 (In Russian).

3. McGinnis R.A. Beet-Sugar Technology. 2nd Edition. New York: Reinhold Publishing Corporation, 1971. 574 (In English).

4. Azrilovich M.Yu. Tekhnologicheskoye oborudovanie sveklosakharnykh zavodov [Technological equipment of sugar beet production]. Moscow: Agropromizdat. 1986. 320 (In Russian).

5. Saprnov A.R. Tekhnologiya sakharного производства [Technology of sugar production]. Moscow: Kolos. 1999. 495 (In Russian).

6. Rudik F.Ya., Bogatyrev S.A. Analiz usloviy raboty i iznosnogo sostoyaniya nozhey tsentrobezhnykh ustanovok [Analysis of working conditions and wear patterns of knives used in centrifugal plants]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal*. 2018. N3. 47-50 (In Russian).

7. Rudik F.Ya. Skryabina L.Yu., Kovylin A.P. Defektnoe sostoyanie nozhey k tsentrobezhnym ustanovkam i povyshenie ikh ustalostnoy prochnosti [Defective condition of knives used in centrifugal plants and ways to increase their fatigue strength]. *Remont, vosstanovleniye, modernizatsiya*. 2014. N8. 22-26 (In Russian).

8. Rudik F.Ya., Skryabina L.Yu., Kovylin A.P. Obespecheniye pokazateley nadezhnosti nozhey dlya izmel'cheniya sakharной svekly [Ensuring the reliability of knives for sugar beet cutting]. *Nauchnoe obozrenie*. 2012. N6. 160-163 (In Russian).

9. Proektirovaniye, konstruirovaniye i raschet tekhniki pishchevykh tekhnologiy [Design, construction and calculation of food production machines] / Ed. by V.A. Panfilov. SPb., Krasnodar: Lan'. 2013. 911 (In Russian).

10. Grebenyuk S.M., Shcherbakov S.M. Issledovaniye silovykh vzaimodeystviy sakharной svekly s barabanom sveklorезki [Study of the interaction force of sugar beet with a beet cutter drum]. *Sakharnaya promyshlennost'*. 1981. N2. 22-25 (In Russian).

11. Genta J., Shorr B.F., Josilevich G.B. Nakopleniye kineticheskoy energii [Accumulation of kinetic energy]. Moscow: Mir. 1988. 248 (In Russian).

12. Birger I.A. Raschet na prochnost' detaley mashin [Strength calculation of machine parts: a reference book]. Moscow: Mashinostroeniye. 1979. 702 (In Russian).

13. Biderman V.L. Teoriya mekhanicheskikh kolebaniy [Theory of mechanical oscillations]. Moscow: Vysshaya shkola. 1980. 400 (In Russian).

14. Belyaev N.M. Soprotivleniye materialov [Strength of materials]. Moscow: Al'yans S. 2014. 608 (In Russian).

15. Rudik F.Ya., Gutuev M.Ch., Vorotnikov I.L. New in Manufacturing and Restoration of Meat-Processing Machines Cutting Tool. *Journal of Huazhong Agricultural University*. 2000. Vol. 19. N3. 292-296 (In English).

16. Rudik F.Ya. Sovershenstvovaniye tekhnologicheskikh protsessov izgotovleniya i vosstanovleniya rezhushchego instrumenta oborudovaniya pererabatyvayushchey otrasli [Improving technological processes of manufacturing and restoration of cutting tools in the processing industry equipment]. Moscow: Rosinformagrotekh. 2000. 182 (In Russian).

17. Storozhev M.V., Popov E.A. Teoriya obrabotki metallov davleniem [Theory of plastic metal forming]. Moscow: Mashinostroeniye. 1977. 423 (In Russian).

18. Lopukhin A.M., Gunn G.Ya., Galkin F.M. Soprotivleniye plasticheskoy deformatsii metallov [Plastic strength of metals]. Moscow: Metallurgiya. 1983. 352 (In Russian).

19. Godzhaev Z.A., Grishin A.P., Grishin A.A., Grishin V.A. Klyuchevye tekhnologii i prognoz razvitiya sel'skokhozyajstvennoy robototekhniki [Key technologies and forecast of agricultural robotics development]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2016. N6 (21). С. 35-41.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 11.05.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 11.05.2019

Статья принята к публикации 04.06.2019
The paper was accepted
for publication on 04.06.2019