

*А.Л. Желудков, С.В. Акуленко, к.т.н., А.А. Бренч¹, к.т.н.
Могилевский государственный университет продовольствия,
¹Белорусский государственный аграрный технический университет,*

НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В КОНСТРУИРОВАНИИ НОЖЕЙ В МАШИНАХ ДЛЯ КУТТЕРОВАНИЯ МЯСНОГО СЫРЬЯ

В работе проанализировано влияние геометрических параметров куттерного ножа на процесс куттерования. Определены основные пути совершенствования конструкций рабочих органов машин для тонкого измельчения мясного сырья, что позволит повысить качество измельчаемого продукта и уменьшить затраты энергии на процесс куттерования. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния куттерных ножей при тонком измельчении мясного сырья в куттерах.

Введение. В мясной отрасли при производстве колбасных изделий широко применяется операция измельчения, которая оказывает существенное влияние на качество фарша и выход готового продукта. При конструировании мясорезущих машин и механизмов необходимо учитывать биологическое происхождение измельчаемого сырья, вид и количество добавок, а также особенности процесса куттерования.

Среди машин для тонкого измельчения мяса особое место занимают куттера. Рабочими органами куттера являются чаша и один или два ножевых вала с серповидными режущими ножами. На каждом валу устанавливается от трех до двенадцати ножей. Частота оборотов ножевого вала в современных куттерах фирм Нагема, Ласка, Зейдельманн, Кремер–Греббе и др. составляет до 6000 оборотов в минуту. Чаша куттера вращается с частотой ориентировочно в сто раз меньше, чем ножевой вал.

Особенностью обработки мяса в куттере является совмещение процессов интенсивного резания и перемешивания мяса, находящегося в чаше. При этом в процессе куттерования значительно увеличивается поверхность контакта белков мышечной ткани и воды, что позволяет в наибольшей степени по сравнению с другими измельчителями использовать естественную влагосвязывающую способность мяса. В процессе куттерования происходит образование также специфического водно–

жиро–белкового геля, который обеспечивает высокое качество колбасного фарша.

Качество колбасных изделий и их выход зависят от ряда факторов. Среди них особое место принадлежит тонкому измельчению мяса в куттере и температурному режиму процесса, причем на качество измельчения в значительной мере влияет форма ножей.

Процесс резания при тонком измельчении мясного сырья осуществляют на высоких скоростях режущих рабочих органов куттеров. Он сопровождается выделением большого количества теплоты, что вызывает значительное повышение температуры сырья и приводит к денатурации белков, снижению водосвязывающей способности полуфабриката и изменению структурно–механических свойств продукта, что существенно снижает качество готовых мясных изделий.

Основным требованием к любому режущему инструменту является сохранение остроты режущей части и геометрических форм рабочего органа в течение наиболее длительного времени, т.е. инструмент должен обладать достаточной жесткостью и высокой износостойкостью.

Конструктивные параметры режущих рабочих органов выбирают с учетом их работы, физического состояния разрезаемого материала, кинематики режущего органа и измельчаемого продукта, прочности и жесткости рабочего органа и других факторов.

Эти обстоятельства обуславливают необходимость точного расчета и контроля при производстве режущих инструментов с оптимальными геометрическими и механическими характеристиками.

Обоснование выбора геометрических параметров ножей. Процесс резания в куттерах отечественного и зарубежного производств осуществляется серповидными ножами, режущая кромка которых выполнена в виде кривой, построенной по определенной спирали, при этом были исследованы: спираль Архимеда с уравнением $R = a\varphi$ и логарифмическая спираль с уравнением $R = a^{\varphi}$.

Для произвольной кривой лезвия [3], описываемой в полярной системе координат уравнением $R=R(\varphi)$, и ножа, вращающегося вокруг ее полюса, общее выражение коэффициента скольжения, известное из дифференциальной геометрии, будет иметь вид

$$K_{\beta} = R \cdot \frac{d\varphi}{dR} \quad (1)$$

где φ – полярный угол; R – радиус–вектор точки лезвия.

Чтобы коэффициент скольжения не уменьшался по мере поворота лезвия, производная $\frac{d\varphi}{dR}$ должна уменьшаться не быстрее, чем растет радиус-вектор.

Выпуклое лезвие ножа, выполненное по Архимедовой спирали с уравнением $R = a\varphi$, не обеспечивает этого требования.

При анализе вышеприведенных спиралей [2], было выявлено, что постоянство коэффициента скольжения K_{β} можно достичь, очертив лезвие только логарифмической спиралью с уравнением

$$R = a^{\varphi}, \quad (2)$$

где R – радиус–вектор спирали; a – постоянный коэффициент.

Основным недостатком ножей, выполненных по логарифмической спирали, является трудность выполнения заточки. Эта проблема решается путем выполнения режущей кромки ножа в виде ломаной линии с i -м количеством прямолинейных участков по закону логарифмической спирали (рис. 1, а).

Благодаря очертанию лезвия ножа куттера логарифмической спиралью с уравнением $R = a^{\varphi}$, достигается постоянство угла резания по всей длине режущей кромки, но из-за сложности выполнения ножей такой конструкции предлагается выполнить режущую кромку в виде ломаной линии, выполненной касательно к логарифмической спирали. Это дает возможность получить постоянство угла резания в середине каждой режущей кромки, что, в свою очередь, обеспечивает равномерность измельчения продукта по всей длине режущей кромки, это позволяет повысить качество готового продукта и эффективность работы ножа куттера.

При этом целесообразно, чтобы длина L_i каждой режущей кромки определялась из выражения

$$L_i = L_{i-1} \frac{R_{i-1}}{R_i}, \quad (3)$$

где R_{i-1} – расстояние от оси вращения ножа до середины $(i-1)$ -й режущей кромки; R_i – расстояние от оси вращения ножа до середины следующей режущей кромки.

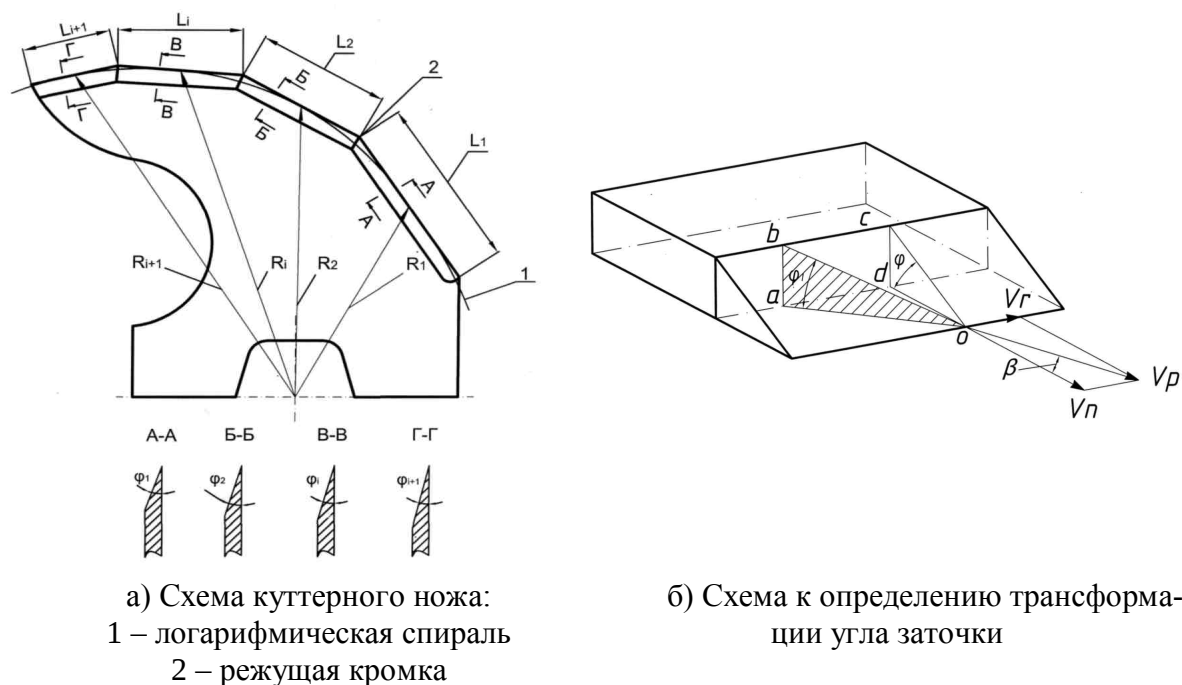


Рисунок 1 – Схема куттерного ножа с режущей кромкой в виде ломаной линии, построенной по закону логарифмической спирали

Использование формулы (3) позволяет соотнести геометрические размеры куттерного ножа и тем самым уменьшает длину каждого следующего прямолинейного участка режущей кромки, что снижает гидравлическое сопротивление, а также затраты энергии на процесс куттерования. Это дополнительно улучшает качество готового продукта и повышает эффективность работы куттера.

Кроме того, при резании волокнистых материалов необходимо, чтобы давление в зоне контакта режущей кромки и продукта не уменьшалось с увеличением расстояния от оси вращения, а наоборот, увеличивалось. Этот эффект может быть достигнут за счет уменьшения угла заточки лезвия по мере увеличения расстояния от оси вращения до режущей кромки либо путем увеличения угла встречи режущей кромки с продуктом. При использовании ножа с серповидной режущей кромкой второй путь более практичен и осуществляется путем увеличения угла встречи по мере роста расстояния от оси вращения до режущей кромки. Однако это ведет к увеличению боковой поверхности ножа, что приводит к более интенсивному повышению температуры фарша во время процесса куттерования.

В то же время использование ножей с ломаной режущей кромкой позволяет уменьшать угол заточки лезвия по мере увеличения расстояния от оси вращения до режущей кромки (рис. 1, а).

При движении лезвия нормально относительно своей режущей кромки определение величины угла заточки производится исходя из обычного представления о геометрии лезвия в статическом состоянии. Нетрудно убедиться, что в процессе резания со скольжением угол заточки в направлении резания меняет свое значение – уменьшается в зависимости от угла скольжения β . Иными словами, переходя от представления о статической геометрии лезвия к представлению о его кинематической геометрии, мы сталкиваемся с явлением трансформации угла заточки.

На рис. 1, б представлена схема лезвия с углом заточки ϕ , равным ϕ . При проникновении лезвия в материал нормально, т.е. по направлению V_n , указанный угол будет равен замеренному статически. В случае, когда лезвие станет проникать в материал под некоторым углом β к нормали, т.е. в направлении V_p , угол заточки должен быть замерен на плоскости, проходящей через это направление, т.е. будет равен углу aob , равным ϕ_1 .

Закономерность изменения угла заточки ϕ_1 в зависимости от изменения угла β может быть определена следующим образом:

$$tg\phi_1 = \frac{ab}{ao}; \quad tg\phi = \frac{dc}{do} = \frac{ab}{do};$$

$$tg\phi_1 \cdot ao = tg\phi \cdot do; \quad \frac{do}{ao} = \cos \beta.$$

Выражаем $tg\phi_1$:

$$tg\phi_1 = tg\phi \cdot \cos \beta \quad (4)$$

Выражение (4) показывает закономерность изменения угла заточки ϕ_1 , в зависимости от изменения угла встречи β . Поэтому для уменьшения лобового сопротивления внедрения лезвия ножа в продукт необходимо выполнять режущую кромку с углом заточки, проходящим через плоскость aob .

В результате исследований влияния геометрических параметров ножа на процесс резания была разработана новая конструкция куттерных ножей (рис. 2).



Рисунок 2 – Фотография головки куттера с ножами, режущая кромка которых выполнена в виде ломаной линии, построенной по закону логарифмической спирали

Новая конструкция куттерного ножа обладает рядом преимуществ по сравнению с серийно выпускаемыми ножами:

- обеспечивается равномерность измельчения продукта по длине режущей кромки;
- за счет трансформации угла заточки снижается лобовое сопротивление внедрения лезвия ножа в продукт;
- уменьшение угла заточки лезвия по мере увеличения расстояния от оси вращения ножа до прямолинейного участка режущей кромки позволяет уменьшить длину режущей кромки, что приводит к уменьшению боковой поверхности ножа и снижению темпа роста температуры обрабатываемого продукта.

При работе ножей в куттерах происходит совмещение процессов резания, смятия и перемешивания мяса, находящегося в чаше. Такие ножи находятся в условиях сложного напряженного состояния. По данным некоторых исследователей давление q на плоскости серповидного ножа составляет 7,5 кПа [1].

Исследование напряженно-деформированного состояния ножа проводили теоретически и экспериментально.

При теоретическом исследовании применяли метод конечных элементов с использованием пакета прикладных программ на ЭВМ. В этом случае была получена распечатка полей напряжения и деформаций по всей плоскости ножа. Из анализа полученных данных видно, что

главные напряжения σ изменялись от нуля до 30 МПа в месте возле посадки на вал.

Для экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния использовались ножи новой конструкции с режущей кромкой в виде ломаной линии, выполненной касательно к логарифмической спирали, разработанные для куттера типа ФК-50.

Плоскость ножа разбивалась на 50 элементов (площадок) в которых определяли напряжение и деформацию. Для проведения испытаний использовали тензодатчики с базой равной 5 мм. Тензодатчики с такой базой измерений являются высокоточными. Для измерения показаний использовали цифровую тензостанцию. Показания по каждому тензодатчику оценивали в среднем по результатам десяти испытаний.

Очевидно, что создать равномерное давление 7,5 кПа на плоскости ножа в искусственных условиях весьма трудно, поэтому исходили из следующих допущений. Прикладывали в центре тяжести ножа сосредоточенную нагрузку P , равную 170 Н:

$$P = qS,$$

где S – площадь ножа, м^2 ; q – давление на плоскости ножа, Па.

Из теоретических исследований напряженно-деформированного состояния куттерного ножа видно, что максимальное напряжение создается в месте посадки ножа на вал. Поэтому очевидно, что для определения максимальных напряжений тензодатчики необходимо располагать в опасной точке у посадочного отверстия. Схема расположения тензодатчиков представлена на рис. 3.

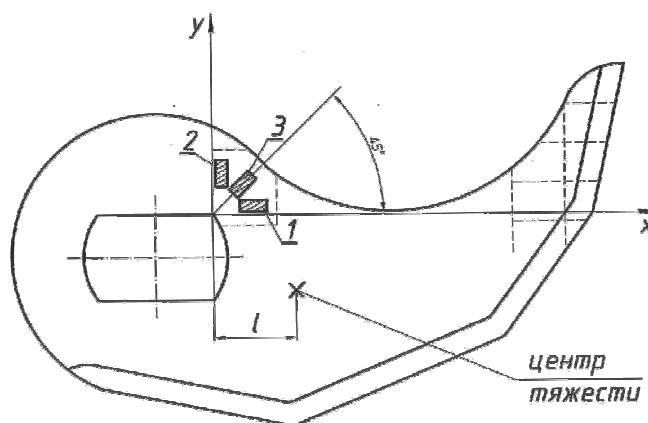


Рисунок 3 – Схема расположения тензодатчиков на плоскости ножа

Очевидно, что в рассматриваемой точке необходимо определить три величины: главные напряжения σ_1 , σ_2 и угол α , который образует напряжение σ_1 с произвольно выбранной осью X (рис. 4).

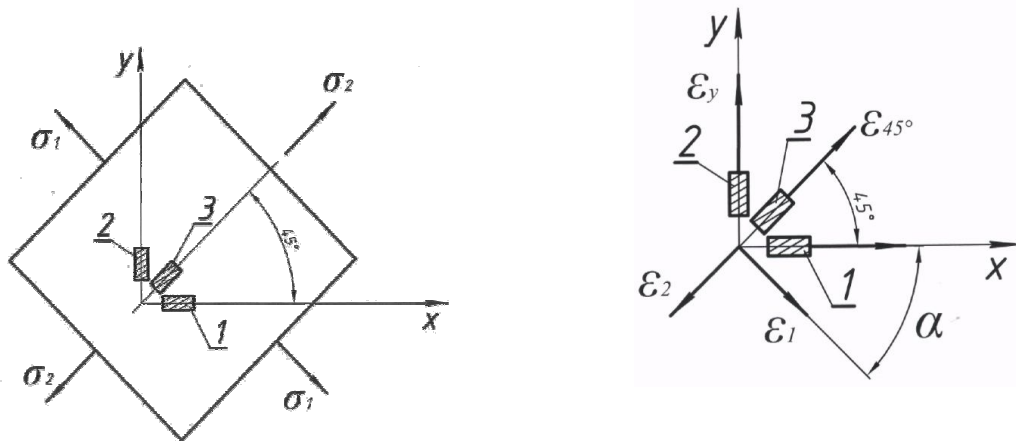


Рисунок 4 – Схема измерения напряжений и относительных деформаций в опасной точке

Для определения напряжения и относительных деформаций, связанных между собой, пользовались обобщенным законом Гука. Главное растягивающее напряжение определяется по формулам:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_1 + \mu \epsilon_2), \quad (5)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_2 + \mu \epsilon_1), \quad (6)$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости, МПа; ϵ_1 и ϵ_2 – главные деформации, м.

Для определения главных деформаций использовали известные выражения из теории прочности:

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2 \cos 2\alpha}, \quad (7)$$

$$\epsilon_2 = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} - \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2 \cos 2\alpha}. \quad (8)$$

Угол α определяется из выражения:

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y - 2\epsilon_{45^\circ}}{\epsilon_x - \epsilon_y}. \quad (9)$$

По результатам испытаний получили следующие средние значения деформаций:

$$\epsilon_x = 120 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad \epsilon_y = -40 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad \epsilon_{45} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Из выражения (9) получаем значение угла α :

$$\alpha = 3,56^\circ.$$

Из выражений (7) и (8) имеем:

$$\varepsilon_1 = 120,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad \varepsilon_2 = -40,62 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Тогда по выражениям (5) и (6) получаем:

$$\sigma_1 = 23,82 \text{ МПа}; \quad \sigma_2 = -0,98 \text{ МПа}.$$

Сравнение теоретического и экспериментального исследований ножа дают основание для точной оценки напряженно-деформированного состояния режущего инструмента, это позволяет утверждать, что ножи новой конструкции находятся в условиях равнопрочного состояния.

Заключение. Анализируя геометрические факторы, влияющие на процесс куттерования мясного сырья, была предложена новая конструкция куттерного ножа с ломаной режущей кромкой. Использование данной конструкции ножей позволяет получить ряд преимуществ по сравнению с известными ножами:

- обеспечивается равномерность измельчения продукта по длине режущей кромки;
- за счет трансформации угла заточки снижается лобовое сопротивление внедрения лезвия ножа в продукт;
- уменьшение угла заточки лезвия по мере увеличения расстояния от оси вращения ножа до прямолинейного участка режущей кромки позволяет уменьшить длину режущей кромки, что приводит к уменьшению боковой поверхности ножа и снижению темпа роста температуры обрабатываемого продукта.

Литература

1. Бояршинов, С.В. Основы строительной механики машин / С.В. Бояршинов – М., 1973. – С. 455.
2. Груданов, В.Я. «Золотая» пропорция в инженерных задачах / В.Я. Груданов. – Могилев, 2006. – С. 288.

3. Груданов, В.Я. Новые куттерные ножи для измельчения мясного сырья. / В.Я. Груданов, И.Д. Иванова, А.А. Бренч // Мясная промышленность. –2003. –№ 4. – С. 33–35.

4. Даурский, А.Н. Резание пищевых материалов. / А.Н. Даурский, Ю.А. Мачихин – М., 1980. – С. 240.

5. Пелеев, А.И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности / А.И. Пелеев – М., 1971. – С.519

6. Предтеченский, Н.А. Механическое оборудование предприятий общественного питания: учеб. для технолог. фак. торг. вузов / Н.А. Предтеченский; под. ред. В.Н. Шувалова, изд. 3-е перераб. и. доп. –М.: Экономика, 1975. –224 с.

A. Zheludkov, S. Akulenko, A. Brench

NEW DIRECTION IN DESIGNING OF KNIFES IN CARS FOR CUTTING MEAT RAW MATERIALS

Summary

In work influence of geometrical parametres cutting a knife on process cutting is analysed. The basic ways of perfection of designs of working bodies of cars for thin crushing of meat raw materials that will allow to raise quality of a crushed product are defined and to reduce expenses of energy for process cutting. Results theoretical and experimental researches of the is intense-deformed condition cutting knives are resulted at thin crushing of meat raw materials in cutting machines.