

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ КУТТЕРНОГО НОЖА С РЕЖУЩЕЙ КРОМКОЙ В ВИДЕ ЛОМАННОЙ ЛИНИИ

А.А. БРЕНЧ¹, А.Л. ЖЕЛУДКОВ², М.В. БРЕНЧ¹

¹Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь

²Могилевский государственный университет продовольствия, Могилев, Республика Беларусь

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

In work influence of geometrical parameters of cutting knife on the process of cutting is analysed. The basic ways of perfection of designs of working bodies of machines for thin crushing meat raw material that will allow to raise quality of a crushed product are certain and reduces expenses of energy for process. Theoretical and experimental researches comparison of a knife provide basis for exact estimation of the cutting tool tense-deforming conditions. It confirms that these knives are in equal in strength conditions.

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.

Качество колбасных изделий и их выход зависят от ряда факторов. Среди них решающее 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, уменьшению водосвязывающей способности полуфабриката и изменению структурно-механических свойств продукта, что существенно снижает качество готовых мясных изделий.

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

Основная часть

Процесс резания в куттерах отечественного и зарубежного производства осуществляется серповидными ножами, режущая кромка которых выполнена в виде кривой, построенной по определенной спирали, при этом были исследованы: спираль Архимеда с уравнением $R = a \cdot \varphi$ и логарифмическая спираль с уравнением

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

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

где φ – полярный угол;

R – радиус-вектор точки лезвия.

Чтобы коэффициент скольжения не уменьшался по мере поворота лезвия, производная должна уменьшаться не быстрее, чем растет радиус-вектор.

Выпуклое лезвие ножа, выполненное по Архимедовой спирали с уравнением $R = a \cdot \varphi$, 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;

φ – полярный угол.

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

Благодаря очертанию лезвия ножа куттера логарифмической спиралью с уравнением $R = a^{\varphi}$, достигается постоянство угла резания в 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 и в середине каждой режущей кромки, что, в свою очередь, обеспечивает равномерность измельчения продукта по всей длине режущей кромки и позволяет повысить качество готового продукта.

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 $i-1$ -ой режущей кромки;

R_i – расстояние от оси вращения ножа до середины следующей режущей кромки.

Выполнение 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

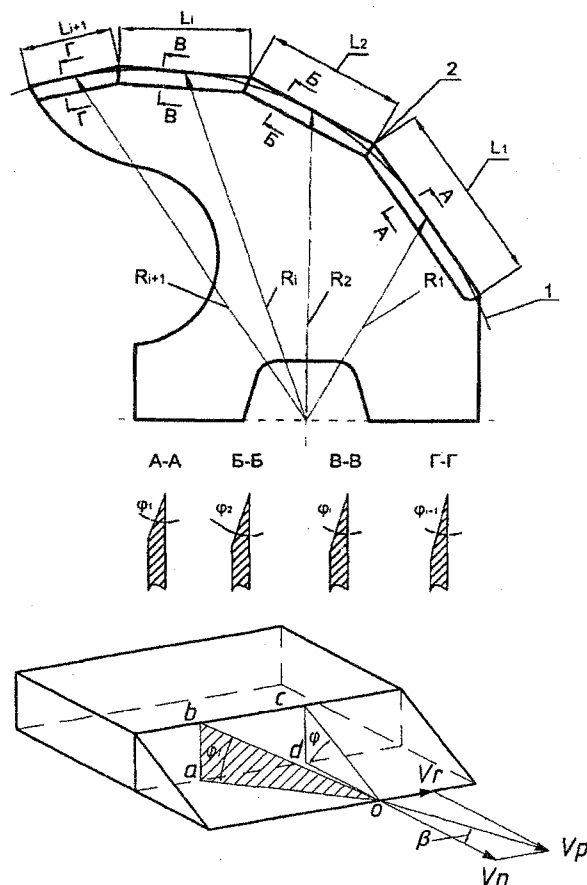


Рис. 1. Схема куттерного ножа с режущей кромкой в виде ломаной линии, построенной по закону логарифмической спирали: а) схема куттерного ножа: 1 — логарифмическая спираль; 2 — режущая кромка; б) схема к определению трансформации угла заточки

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. 1а).

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 рисунке 1б представлена схема лезвия с углом заточки ϕ , равным ϕ . При проникновении лезвия в ма-

териал 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 в плоскости, проходящей через это направление, т. е. будет равен углу aob , равному ϕ_1 .

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

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

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

Выражаем $\operatorname{tg} \phi_1$:

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

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).

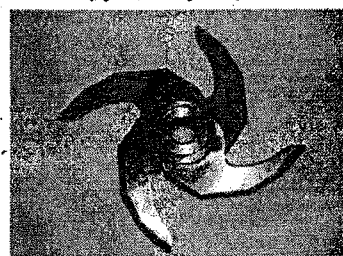


Рис. 2. Фотография головки куттера с ножами, режущая кромка которых выполнена в виде ломаной линии, построенной по закону логарифмической спирали

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 режущей 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 исследований давление q на плоскости серповидного ножа составляет 0,0075 МПа [1].

Исследование напряженно-деформированного состояния ножа проводилось 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 деформации по всей плоскости ножа. Из анализа полученных данных видно, что главные напряжения изменя-

лись 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 определялись напряжения и деформация. Для проведения испытаний использовались тензодатчики с базой, равной 5 мм. Тензодатчики с такой базой измерений являются высокоточными. Для измерения показаний использовалась цифровая тензостанция. Показания по каждому тензодатчику оценивались в среднем по результату десяти испытаний.

Очевидно, что создать равномерное давление 0,0075 МПа на плоскости ножа в искусственных условиях весьма трудно. Поэтому исходили из следующих соображений. Прикладывали в центре тяжести ножа сосредоточенную нагрузку P , равную 170 Н.

$$P = q \cdot A,$$

где A – площадь ножа, m^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.

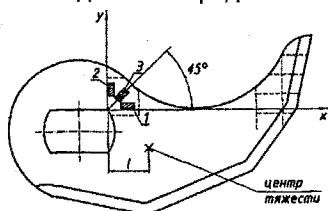


Рис. 3. Схема расположения тензодатчиков на плоскости ножа

Очевидно, что в рассматриваемой точке необходимо определить три величины: главные напряжения y_1 , y_2 и угол β , который образует напряжение y_1 с произвольно выбранной осью X (рис. 4).

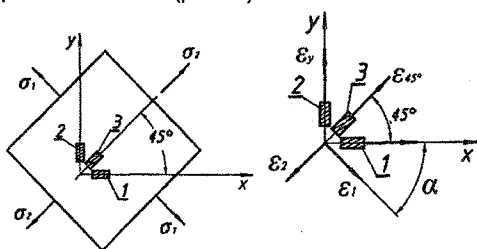


Рис. 4. Измерения напряжений и относительных деформаций в опасной точке

Для определения напряжения и относительных деформаций, связанных между собой, пользовались

обобщенным законом Гука. Известно, что главное растягивающее напряжение определяется по формулам:

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

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

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:

$$\epsilon_2 = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2 \cos 2\alpha} \quad (7)$$

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

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:

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

Из выражения (9) получаем значение угла α :

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

Из выражений (7) и (8) имеем

$$\epsilon_1 = 120,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad \epsilon_2 = -40,62 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

Тогда по выражениям (5, 6) получаем

$$y_1 = 23,82 \text{ МПа}; \quad y_2 = -0,98 \text{ МПа}$$

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

Заключение

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 уменьшит затраты энергии на процесс куттерования. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния куттерных ножей при тонком измельчении мясного сырья в куттерах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бояршинов, С.В. Основы строительной механики машин / С.В. Бояршинов. – М., 1973. – 455 с.
- Груданов, В.Я. «Золотая» пропорция в инженерных задачах: монография / В.Я. Груданов. – Могилев: МГУ им. А.А. Кулешова, 2006. – 288 с.
- Груданов В.Я., Иванова И.Д., Бренч А.А. Новые куттерные ножи для измельчения мясного сырья / Мясная промышленность. – 2003. – № 4. – С. 33–35.
- Даурский, А.Н., Мачихин, Ю.А. Резание пищевых материалов. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 240 с.
- Пелеев, А.И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности / А.И. Пелеев – М.: Пищевая пром-сть, 1971. – 520 с.
- Предтеченский, Н.А. Механическое оборудование предприятий общественного питания. Под. ред. В.Н. Шувалова. Учебник для технол. фак. торг. вузов. Изд. 3-е перераб. и доп. – М.: Экономика, 1975. – 224 с.