

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ РЕЖУЩЕГО МЕХАНИЗМА МАКАРОННОГО ПРЕССА НА ОСНОВЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЗАНИЯ

В.Я. Груданов,

профессор каф. технологий и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

А.Б. Торган,

доцент каф. технологий и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Л.Т. Ткачева,

доцент каф. управления охраной труда БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

А.А. Лелевич,

студент инженерно-технологического факультета БГАТУ

В статье проанализированы основные закономерности теории резания материалов и сформулированы основные направления совершенствования конструкции режущего механизма макаронного пресса. Получена формула для определения оптимальной длины режущей кромки лезвий вращающегося ножа в зависимости от ширины кольцевой рабочей поверхности матрицы.

Ключевые слова: теория резания, скользящее резание, коэффициент скольжения, макаронный пресс, режущая кромка лезвия.

The basic laws of the theory of materials cutting and formulates the main directions for improving the design of the cutting mechanism of pasta press are analyzed in the article. The formula for determining the optimal length of the cutting edge of the blades of a rotating knife depending on the width of the annular working surface of the matrix was obtained.

Keywords: cutting theory, sliding cutting, sliding coefficient, pasta press, cutting edge of the blade.

Введение

Резание может быть осуществлено при относительном перемещении режущего инструмента и продукта, а также в зависимости от направления этого перемещения. Резание принято подразделять на рубящее и скользящее [1, 2].

При рубящем резании лезвие ножа, перемещаясь перпендикулярно режущей кромке, деформирует продукт и уплотняет его поверхностный слой, в котором возникают контактные напряжения, имеющие максимальное значение в зоне контакта с острой кромкой ножа.

В отличие от рубящего резания, при скользящем для резания продукта требуются меньшие уплотнение и усилие, т.к. перерезание продукта осуществляется отдельными микрозубчиками, причем суммарная длина микрозубчиков, одновременно участвующих в резании продукта, всегда меньше длины режущей кромки лезвия. По этой причине при скользящем резании величина контактных напряжений, необходимая для резания продукта, следовательно, и требующая усилия, значительно меньше, чем при рубящем резании. Важно отметить, что поверхности среза при скользящем резании получаются более гладкими и

ровными, чем при рубящем резании, т.к. продукт подвержен меньшему силовому воздействию со стороны режущего инструмента. Скользящее резание целесообразно применять при резании пластичных продуктов с невысокой механической прочностью, при этом продукт значительно меньше деформируется. Сочные продукты не теряют сока, а их ломтики не разваливаются и не деформируются [3, 4].

Однако, как показывает опыт изучения технологий производства макаронных изделий, в макаронных прессах отечественного и зарубежного производства работа режущего механизма для отрезания отформованных полуфабрикатов основана на теории рубящего резания: макаронные прессы ЛПЛ-2М, ЛПЛ-1М, ЛМБ, ЛПШ-500, ЛПШ-750, ЛПШ-1000, швейцарский макаронный пресс ТРХО (210/520, 210/600, 2×210/520 и 2×2210/600). Рубящее резание (отрезание) применяется в современных пресс-автоматах РТ-ПМ-21, РТ-ПМ-21-01, РТ-ПМ-31, а также в пресс-автомате МИТ-2 (г. Барановичи). Неравномерная скорость прессования в сочетании с методом рубящего резания приводит к увеличению количества отходов в виде обрезков и в конечном счете – к снижению производительности. Количество отходов по указанной причине на

макаронных прессах достигает 20 %, а качество отрезанных полуфабрикатов не отвечает технологическим требованиям.

Кроме того, в учебной и научно-технической литературе до настоящего времени отсутствуют данные о взаимосвязи геометрических и конструктивных параметров трущейся пары нож-матрица, что не позволяет оптимизировать процесс резания.

С целью получения поверхности среза гладкой и ровной и уменьшения отходов, режущий механизм макаронных прессов должен работать на основе теории скользящего резания трущейся пары нож-матрица, при этом его геометрические характеристики должны быть максимально взаимосвязаны с конструктивными параметрами матрицы [5-7].

Цель работы – на основе законов скользящего резания разработать математическую модель, позволяющую связать основные геометрические и конструктивные параметры трущейся пары нож-матрица и оптимизировать процесс отрезания отформованных полуфабрикатов, что, в свою очередь, приведет к уменьшению удельных энергозатрат, снижению процента бракованных изделий и улучшению качества готового продукта.

Основная часть

Скорость v любой точки ножа относительно продукта может быть представлена суммой двух скоростей: v_n , направленной по нормали к режущей кромке лезвия, и v_τ , направленной по касательной к ней [8, 9]. Абсолютная величина скорости

$$v = \sqrt{v_n^2 + v_\tau^2} \quad (1)$$

Угол β , заключенный между нормалью к режущей кромке и скоростью относительно продукта, называется углом скольжения. Тангенс угла скольжения называется коэффициентом скольжения K_β , который численно равен отношению касательной скорости v_τ к нормальной v_n

$$K_\beta = \operatorname{tg} \beta = \frac{v_\tau}{v_n} \quad (2)$$

С увеличением коэффициента скольжения K_β улучшается и качество нарезанного продукта: кусочки меньше деформируются, имеют более чистую поверхность среза. При скользящем резании сопротивление перерезанию волокон и стенок клеток продукта уменьшается с возрастанием угла скольжения.

Коэффициент скольжения может принимать численные значения от нуля до ∞ . При $K_\beta = 0$ имеет место рубящее резание, при $K_\beta = \infty$, режущий инструмент совершает скользящее движение вдоль продукта, не разрезая его.

При скользящем резании с увеличением коэффициента скольжения K_β величина общего усилия, действующая на инструмент, а также нормальная составляющая этого усилия, от которых в большей степени зависит деформация продукта при резании, уменьшается, что способствует более качественному отрезанию отформованных полуфабрикатов

$$\begin{aligned} v_n &= \omega r \cos \beta \\ v_\tau &= \omega r \sin \beta \end{aligned} \quad (3)$$

где ω – угловая скорость ножа.

При использовании вращающегося ножа с прямолинейной кромкой лезвия, расположенной под углом к радиусу, минимальная скорость v произвольной точки A равна $v = \omega r$ и направлена перпендикулярно к радиусу.

Рассмотрим изменение K_β по длине прямолинейного лезвия (рис. 1).

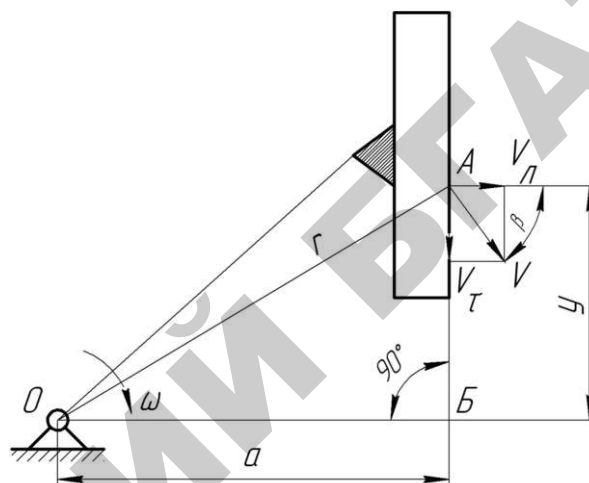


Рисунок 1. Схема определения коэффициента скольжения по длине прямолинейного лезвия

Как видно из рисунка 1, коэффициент скольжения

$$K_\beta = \frac{v_\tau}{v_n} = \operatorname{tg} \beta = \frac{a}{y}, \quad (4)$$

где a – наименьшее расстояние от центра вращения до режущей кромки лезвия или ее продолжение;

y – расстояние от рассматриваемой точки A до пересечения режущей кромки с опущенным на нее перпендикуляром из центра вращения.

При постоянной a коэффициент скольжения K_β изменяется по длине лезвия в зависимости от y по закону гиперболы. В точке B ($y = 0$) нормальная составляющая скорости $v_n = 0$, $K_\beta = \infty$, т.е. резания не будет. При увеличении y , K_β уменьшается. При $y = \operatorname{const}$ K_β возрастает с увеличением a . Если $a = 0$, режущая кромка лезвия совпадает с радиусом, $K_\beta = 0$. Значит, осуществляется рубящее резание. Для качественной нарезки пищевых продуктов необходимо, чтобы K_β по длине лезвия был постоянным или мало изменялся. С учетом вышеизложенных теоретических предпосылок определим коэффициент скольжения трущейся пары нож-матрица макаронного прессы.

Коэффициент скольжения трущейся пары нож-матрица. Построение математической модели. Как уже отмечалось, при скользящем резании сопротивление перерезанию волокон и стенок клеток продукта уменьшается с возрастанием угла скольжения или, что то же самое, – с увеличением коэффициента скольжения и длины режущей кромки лезвия.

Поэтому в системе нож-матрица необходимо учитывать не только законы скользящего резания, но и максимальную длину режущей кромки лезвия. На рисунке 2 представлена схема определения коэффициента скольжения по длине прямолинейного лезвия в трущейся паре нож-матрица.

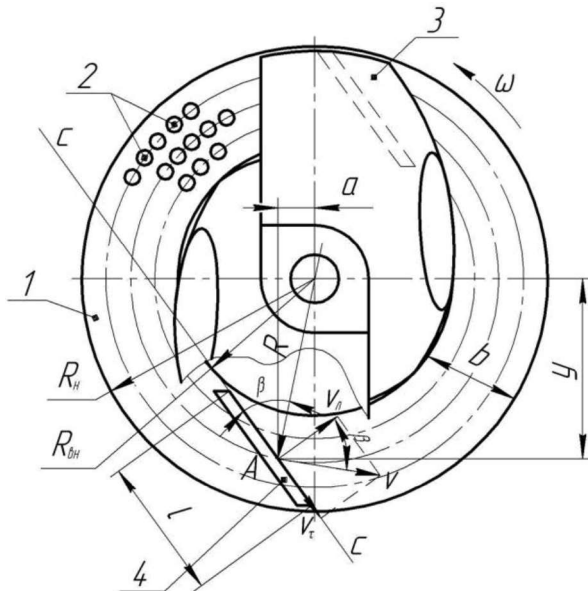


Рисунок 2. Схема определения коэффициента скольжения по длине прямолинейного лезвия: 1 – матрица; 2 – отверстия перфорации; 3 – вращающийся нож; 4 – лезвие ножа; l – длина режущей кромки лезвия; R_n – наружный радиус матрицы; $R_{вн}$ – внутренний радиус матрицы; $C-C$ – касательная к внутренней окружности $R_{вн}$; V – линейная скорость произвольной точки A ; V_n , V_r – нормальная и касательная составляющие линейной скорости V ; β – угол скольжения; a , y – координаты точки A ; R – радиус вращения точки A ; b – ширина рабочей поверхности матрицы; ω – угловая скорость ножа

Как видно из рисунка 2, коэффициент скольжения K_β определяется по формуле

$$K_\beta = \frac{V_r}{V_n} = tg\beta \frac{a}{y} \quad (5)$$

Режущая кромка лезвия 4 вращающегося ножа 3 проходит по касательной $C-C$ к внутренней окружности $R_{вн}$ и в этом случае длина l режущей кромки лезвия 4 будет максимальной, а коэффициент скольжения K_β – наибольшим.

При увеличении y коэффициент скольжения K_β уменьшается. При $y = const$ K_β возрастает с увеличением a . Если $a = 0$, $K_\beta = 0$ – имеет место рубящее резание.

Таким образом, расположение режущей кромки лезвия наклонено по касательной $C-C$ к внутренней окружности $R_{вн}$ матрицы, позволяет получить наибольшую длину l лезвия 4 и, как следствие, создать наилучшие условия для скользящего резания и процесса измельчения в целом.

Определение оптимальной длины режущей кромки лезвия ножа. С увеличением коэффициента

скольжения K_β суммарная сила сопротивления перерезанию продукта P и ее нормальная составляющая P_n уменьшаются, что и приводит к снижению энергозатрат на процесс измельчения.

Нормальная P_n и касательная P_τ составляющие сопротивления перерезанию P (рис. 3) определяются по формулам:

$$P_n = P \cos \beta = ql \cos^2 \beta \quad (6)$$

$$P_\tau = P \sin \beta = ql \sin \beta \cdot \cos \beta, \quad (7)$$

где q – удельное сопротивление продукта на единицу длины лезвия, $H \cdot м$;

l – длина режущей кромки лезвия ножа, участвующая в отрезании слоя продукта, м.

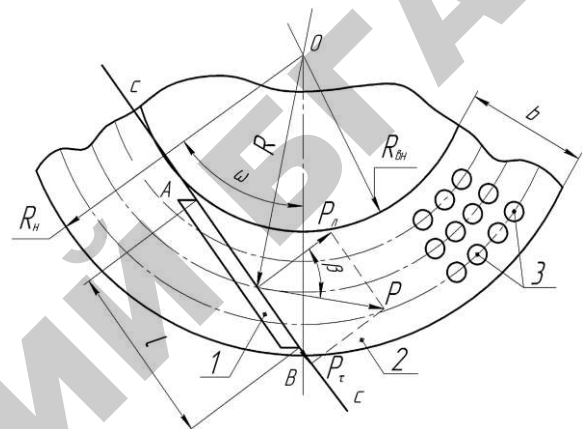


Рисунок 3. Схема определения оптимальной длины режущей кромки лезвия ножа:

P – сила сопротивления перерезанию продукта; P_n – нормальная составляющая силы P ; P_τ – касательная составляющая силы P ; β – угол скольжения; 1 – лезвие ножа; 2 – матрица; 3 – отверстие перфорации; l – длина режущей кромки лезвия

Сопротивление перерезанию P и его составляющие P_n и P_τ в зависимости от коэффициента скольжения K_β имеют вид:

$$P = q \cdot l \cdot \frac{1}{\sqrt{1+K_\beta^2}} \quad (8)$$

$$P_n = q \cdot l \cdot \frac{1}{1+K_\beta^2} \quad (9)$$

$$P_\tau = q \cdot l \cdot \frac{K_\beta}{1+K_\beta^2} \quad (10)$$

Из формул (8-10) следует, что с увеличением коэффициента скольжения K_β суммарная сила сопротивления перерезания P и ее нормальная составляющая P_n уменьшаются, причем P_n – более значительно, чем P

Из рисунка 3 определяем оптимальную длину режущей кромки лезвия ножа. Касательная, проведенная к окружности, есть перпендикуляр к радиусу вращения, опущенному в точку касания окружности и касательной. Следовательно, треугольник OAB – прямоугольный (рис. 3).

По теореме Пифагора $AB = \sqrt{OB^2 - OA^2}$,

где $AB = l$ – длина прямолинейной режущей кромки лезвия ножа;

$OA = R_{вн}$ – внутренний радиус рабочей поверхности матрицы;

$OB = R_n$ – наружный радиус рабочей поверхности матрицы.

$$\text{Значит } l = \sqrt{R_n^2 - R_{вн}^2} = \sqrt{(R_{вн} + b)^2 - R_{вн}^2} = \sqrt{b(2R_{вн} + b)}.$$

Таким образом

$$l = \sqrt{b(2R_{вн} + b)} \quad (11)$$

Данная формула позволяет увидеть взаимосвязь геометрических и конструктивных параметров трущей пары нож-матрица.

Оценка эффективности скользящего резания. Графические зависимости формул (8), (9) и (10) представлены на рисунке 4.

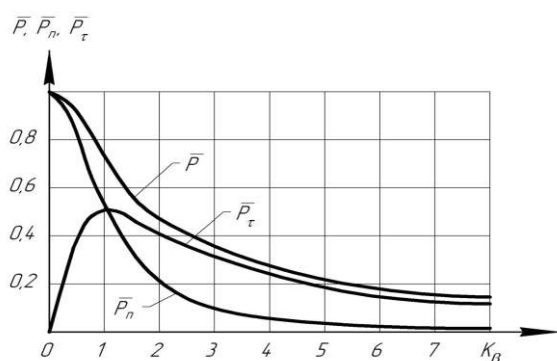


Рисунок 4. Зависимость сопротивления перерезанию от коэффициента скольжения при скользящем резании

Как следует из формул (8), (9), (10) и рисунка 4, с увеличением коэффициента скольжения K_β суммарная сила сопротивления перерезанию P и ее нормальная составляющая P_n уменьшаются, причем P_n более значительно, чем P . Касательная составляющая P_τ вначале возрастает, достигая максимума при $K_\beta = 1$, после чего убывает, приближаясь по величине к P .

Из графиков на рисунке 4 можно сделать вывод о том, что при скользящем резании суммарная сила сопротивления перерезанию P уменьшается в несколько раз, а следовательно, и удельные энергозатраты.

Заключение

На основе анализа литературных данных, а также изучения основных закономерностей теории резания материалов сформулированы основные направления совершенствования конструкции режущего механизма макаронного пресса. В частности, установлено, что наилучшие показатели по энергозатратам и качеству готового продукта обеспечивает скользящее резание макаронных полуфабрикатов, а не рубящее, имеющее место в режущих механизмах макаронных прессов.

На основе закономерностей скользящего резания получена формула для определения оптимальной длины режущей кромки лезвия вращающегося ножа в зависи-

мости от ширины кольцевой рабочей поверхности матрицы, при этом определен оптимальный угол наклона режущей кромки лезвия ножа, позволяющей получить наибольший коэффициент скольжения [10-12].

Полученные результаты были использованы при разработке матриц для производства макаронных изделий [10-12].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ивашов, В.И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности: учеб. пос.: в 2 ч. Оборудование для переработки мяса / В.И. Ивашов. – СПб.: Гиорд, 2007. – Ч. 2. – 464 с.
2. Клименко, М.Н. Развитие теории процесса резания мяса и совершенствование машин для измельчения сырья в производстве колбасных изделий: дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12 / М.Н. Клименко. – М., 1990. – 460 с.
3. Чижикова, Т.В. Машины для измельчения мяса и мясных продуктов / Т.В. Чижикова. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 302 с.
4. Медведев, Г.М. Технология макаронного производства: учебник для вузов / Г.М. Медведев. – М.: Колос, 1998. – 272 с.
5. Чернов, М.С. Оборудование макаронной промышленности за рубежом / М.С. Чернов. – М.: ЦНИИТЭИпищепром, 1978. – 232 с.
6. Оборудование предприятий общественного питания: в 3-х т. / В.Д. Елхина [и др.]. – Механическое оборудование: т. 1. – М.: Экономика, 1987. – 447 с.
7. Назаров, Н.И. Технология макаронных изделий: учебник для вузов / Н.И. Назаров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Пищевая промышленность, 1978. – 286 с.
8. Вайтехович П.Е. Моделирование и оптимизация технологических процессов и оборудования / П.Е. Вайтехович, В.С. Францкевич. – Мн.: БГУ, 2014 – 268 с.
9. Груданов, В.Я. Основы инженерного творчества / В.Я. Груданов. – Мн.: БГУ, 2005. – 299 с.
10. Груданов, В.Я. «Золотая» пропорция в инженерных задачах / В.Я. Груданов. – Могилев: МГУ им. А.А. Кулешова, 2006. – 288 с.
11. Матрица для производства макаронных изделий: пат. 7401 Респ. Беларусь, МПК А21С11 / 16 / В.Я. Груданов, В.Я. Смагин, А.А. Выскварко; заявитель Могилевский государственный университет продовольствия. – № а 20020639; заявл. 18.07.2002; опубл. 30.09.2005 // Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – № 2. – С. 42.
12. Матрица для производства макаронных изделий: пат. 12618 Респ. Беларусь, МПК А21С3/00 / В.Я. Груданов, А.А. Бренч, Р.В. Флексер; заявитель Белор. государственный аграрный технический университет. – № а 20070358; заявл. 05.04.2007; опубл. 30.12.2009. – Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 3. – С. 58.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 13.03.2020