

УДК 65.59

**Анализ влияния конструктивных параметров базовой установочной пластины на энергоемкость процесса обвалки реберного мяса**

Пеленко В.В., Азаев Р.А., Зуев Н.А., Крысин А.Г.

pelenko1@rambler.ru

Санкт-Петербургский государственный университет  
низкотемпературных и пищевых технологий

*Получено математическое выражение для энергоемкости процесса обвалки мяса реберных костей, на основе которого предложено техническое решение значительно снижающее затраты энергии на процесс обвалки*

Ключевые слова: обвалка, ребро, деформация, изгиб

**The analysis of influence of design data of a base adjusting plate on power consumption of process of a boning of costal meat**

Pelenko V. , Azaev R. , Zuev N., Krysin A.

pelenko1@rambler.ru

Saint-Petersburg state university of refrigeration and food  
engineering

*Mathematical expression for power consumption of process of a boning of meat of costal bones on which basis the technical decision much reducing expenses of energy for boning process is offered is received*

Keywords: a boning, an edge, deformation, a bend,

Механизированный процесс обвалки мяса реберного отруба состоит из целого ряда последовательных операций.

На первом этапе оператором осуществляется разрез вдоль каждого ребра соединительной ткани, связывающей мякотную компоненту с костной

поверхностью и одновременное отделение мякотной компоненты от костной основы специальным двухлезвийным ножом (дисковое лезвие режет, плужковое лезвие отделяет).

Вторая фаза заключается в укладке реберной коробки с наружной ориентацией разрезанной и отделенной соединительной ткани на базовую гибкую металлическую пластину.

На третьем этапе осуществляется прижим мясной межреберной ткани к пластине специальными гибкими элементами (лента, тросик, и т.п.), закрепляемыми на краевых сечениях базовой установочной пластины.

Четвертая фаза состоит в силовом изгибе этой многослойной композиции вокруг срединной оси установочной пластины центральным симметричным усилием, формируемым профильным толкателем цилиндрической формы.

При этом, огибая толкатель, пластина с реберной коробкой постепенно приобретают его конфигурацию, благодаря чему гибкие элементы, расположенные между ребер, создают внутренние напряжения, отрывающие мясную ткань от реберных костей за счет стремления последних сохранять естественную исходную форму.

Начало отделения мясной компоненты от ребер происходит в момент достижения напряжениями отрыва в краевых сечениях реберных костей величины напряжений адгезионной прочности связи соединительной пленочной ткани с костной поверхностью ребер.

По мере увеличения хода профильного толкателя увеличивается деформация пластины с гибкими элементами, прижимающими к ней мясную компоненту и продолжается дальнейший отрыв пленочной ткани от костной основы вплоть до тех пор, пока реберные кости не освободятся окончательно от мясного массива.

С точки зрения теории упругости и сопротивления материалов, описанная многокомпонентная слоистая структура представляет собой балку (пластина) на упругом основании (реберные кости) [1].

Основываясь на свойстве аддитивности и пользуясь принципом суперпозиции, можно определить энергоемкость как всего процесса обвалки в целом, так и энергоемкость составляющих отдельных элементов – базовой установочной пластины и реберных костей, пренебрегая энергоемкостью прижимных гибких элементов (тросиков) в связи с малостью.

В общем случае значение потенциальной энергии, накапливаемой при прямом поперечном изгибе, определяется соотношением [1, 2]:

$$U = \sum_{i=1}^n \int_0^l \frac{M^2 dz}{2EI} + \sum_{i=1}^n \int_0^l k \frac{Q^2 dz}{2GF}, \quad (1)$$

где:

$M$  – изгибающий момент в сечении “ $z$ ”,

$Q$  – перерезывающая сила в этом сечении,

$l$  – длина участка,

$k$  – коэффициент неравномерности распределения касательных напряжений по высоте поперечного сечения рассматриваемой балки ( $k=1,2$ ),

$n$  – количество объектов нагружения ( $n = 2$ ; установочная пластина  $i = 1$ , реберная коробка  $i = 2$ ),

$z$  – продольная координата,

$E, G$  – модуль продольной упругости и модуль сдвига для нагружаемого материала,

$F$  – площадь поперечного сечения объекта нагружения,

$I$  – момент инерции поперечного сечения при изгибе объекта нагружения.

Рабочая расчетная схема процесса обвалки представлена рисунками 1 и 2.

Для установочной пластины и костей реберной коробки соотношение (1) можно записать в следующей форме:

$$U = 2 \left( \sum_{i=1}^n \int_0^{l/2} \frac{M^2 dz}{2EI} + \sum_{i=1}^n \int_0^{l/2} k \frac{Q^2 dz}{2GF} \right). \quad (2)$$

Для базовой установочной пластины ( $i = 1$ ) изгибающий момент и перерезывающая сила в сечении с координатой “ $z$ ” могут быть найдены из условия совместности перемещений в процессе разрушения пленочной соединительной ткани .

Единичной реберной костью, в момент начала отрыва мякотной ткани, создается за счет деформации ребра усилие, равное силе адгезии  $P_{адг.}$  (Н/м) (удельной силе связи мякотной ткани с поверхностью единичного ребра), а к моменту окончания процесса отделения реберной кости величина прогиба

установочной пластины достигает значения  $Y_{отд.}$ . В соответствии с литературными источниками [2, 4] и рисунком 1, запишем:

$$Y_{отд.} = \frac{P \cdot l^3}{24EI} \quad (3)$$

Учитывая, что суммарная сила адгезии составляет величину  $f_{адг.} = m \cdot P_{адг.}$ , уравнение равновесия сил в проекции на ось  $Y$  примет вид (Рис.2.):

$$m \cdot P_{адг.} = P/2. \quad (4)$$

Здесь:

$m$  – количество костей в реберной коробке (достигает 18).

Для изолированной единичной кости уравнение (3) преобразуется к виду:

$$Y_{отд.} = \frac{P_{адг.} \cdot l_k^3}{24E_k I_k} \quad (5)$$

Уравнение (3) для изолированной установочной пластины примет следующую форму:

$$Y_{отд.} = \frac{P_{пл} \cdot l_{пл}^3}{24E_{пл} I_{пл}} \quad (6)$$

Рабочее усилие деформации собственно пластины до необходимой величины перемещения краевого сечения  $Y_{отд.}$ , приложенное в середине пролета, при условии  $l_{пл} = l_k$ , найдем из системы уравнений (5) и (6):

$$P_{пл} = \frac{P_{адг.} \cdot E_{пл} I_{пл}}{E_k I_k} \quad (7)$$

Таким образом, изгибающий момент и перерезывающая сила для изолированной пластины составят величины  $M_1 = (P_{пл}/2) \cdot Z$  и  $Q_1 = P_{пл}/2$ , а с учетом полученного соотношения (7) приобретут вид:

$$M_1 = \frac{P_{адг.} \cdot E_{пл} I_{пл}}{2E_k I_k} \cdot Z \quad (8)$$

$$Q_1 = \frac{P_{адг.} \cdot E_{пл} I_{пл}}{2E_k I_k} \quad (9)$$

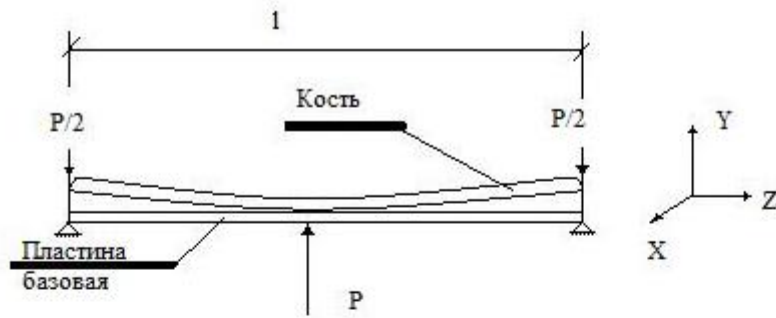


Рис.1. Схема начала процесса обвалки

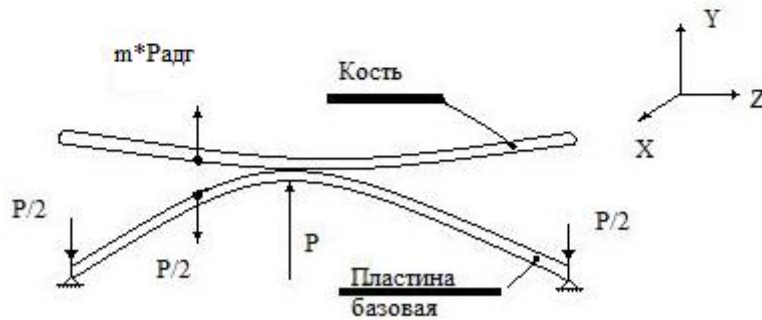


Рис.2. Схема завершения процесса обвалки

Для реберных костей ( $i = 2$ ):  $M_{2 \text{ нач.}} = m \cdot P_{\text{адг}}$ ,  $Q_2 = m \cdot P_{\text{адг}}$ . С учетом перемещения точки приложения адгезионного усилия от крайнего сечения до середины кости, имеем постоянно для рассматриваемого сечения с координатой «z» значение  $z=0$  и изгибающий момент в этом сечении также составит величину  $M_2 = 0$ . Таким образом, для «m» реберных костей работу совершают лишь перерезывающие, адгезионные силы и энергия деформации костей реберной коробки определяется работой этих сил.

Как известно [5], работа сил адгезии, так же как и сил поверхностного натяжения, определяется произведением удельной силы адгезии на величину площади образуемой новой свободной поверхности.

Потенциальная энергия деформации костей реберной коробки таким образом запишется в виде:

$$U_k = m * P_{адг} * F_{отр.}, \quad (10)$$

где:

$F_{отр.}$  – площадь образующейся свободной поверхности при отрыве мягкой ткани от поверхности единичного ребра.

Потенциальная энергия деформации базовой пластины, накопленная при ее изгибе, приобретает следующий вид:

$$U_{пл} = \int_0^{l/2} \frac{\left[ \frac{P_{адг} * E_{пл} I_{пл}}{2 E_k I_k} * z \right]^2 dz}{E_{пл} I_{пл}} + k \int_0^{l/2} \frac{\left( \frac{P_{адг} * E_{пл} I_{пл}}{2 E_k I_k} \right)^2 dz}{G_{пл} F_{пл}}. \quad (11)$$

Для костей реберной коробки соотношение (2) приобрело вид уравнения (10).

В таком случае уравнение (2), с учетом (10) и (11), примет форму:

$$U = U_{пл} + U_k = \frac{P_{адг}^2 * E_{пл} I_{пл}}{96 * (E_k I_k)^2} l^3 + k \left( P_{адг} \frac{E_{пл} I_{пл}}{E_k I_k} \right)^2 \frac{l}{8 G_{пл} F_{пл}} + m P_{адг} F_{отр} \quad (12)$$

Для анализа степени влияния долевой составляющей работы перерезывающей силы в общей энергоемкости процесса (и базовой установочной пластины и реберных костей), соотношение (12) удобнее представить в виде:

$$U = U_{пл} + U_k = \frac{P_{адг}^2 * E_{пл} I_{пл}}{96 * (E_k I_k)^2} l^3 \left( 1 + k \frac{12 E_{пл} I_{пл}}{G_{пл} F_{пл} l^2} \right) + m P_{адг} F_{отр}. \quad (13)$$

Оценим величину  $\Pi$ , входящую в соотношение (13), в сравнении с единицей.

$$\Pi = k \frac{12 E_{пл} I_{пл}}{G_{пл} F_{пл} l^2}. \quad (14)$$

Исходные данные для расчетов принимают следующие реальные значения.

Для базовой установочной пластины прямоугольной формы 0,45\*0,3м\*м:

$$I_1 = I_{пл} = \frac{b h^3}{12}; \quad b=0,45\text{м}; \quad l_{пл}=0,3\text{м}; \quad h=2 * 10^{-3}\text{м}; \quad I_1=0,3 * 10^{-9}\text{м}^4.$$

$$F_1 = F_{\text{пл}} = b * h; \quad F_1 = 0,9 * 10^{-3} \text{ М}^2.$$

$$E_1 = E_{\text{пл}} = 2 * 10^{11} \text{ Па}; \quad G_1 = G_{\text{пл}} = 8 * 10^{10} \text{ Па}.$$

Для реберных костей:

$$I_2 = I_K = \pi \frac{a_K b_K^3}{4}; \quad a_K = 17,36 * 10^{-3} \text{ м}; \quad b_K = 6,3 * 10^{-3} \text{ м}; \quad I_2 = 3,41 * 10^{-9} \text{ м}^4;$$

$$l_K = 0,3 \text{ м}$$

$$F_2 = \pi a_K b_K; \quad F_2 = 0,34 * 10^{-3} \text{ м}^2; \quad E_2 = E_K = 2,4 * 10^9 \text{ Па}; \quad G_2 = G_K = 8,7 * 10^8 \text{ Па}; \quad F_{\text{отр.}} = 2 * l_K * a_K; \quad (\text{Появление коэффициент «2» связано с одновременным образованием двух свободных поверхностей при отрыве}); \quad F_{\text{отр.}} = 1,04 * 10^{-2} \text{ м}^2.$$

В таком случае  $\Pi$  составит величину:  $\Pi = 0,67 * 10^{-3}$ . Таким образом, вклад механической работы перерезывающих сил в энергоёмкость процесса обвалки составляет для установочной пластины величину менее 0,07%, чем вполне можно пренебречь.

Уравнение (13) для энергоёмкости процесса обвалки реберного отруба в этом случае существенно упрощается и принимает следующий вид:

$$U = U_{\text{пл}} + U_K = \frac{R_{\text{адг}}^2 * E_{\text{пл}} l_{\text{пл}}}{96 * (E_K I_K)^2} l^3 + m * R_{\text{адг}} * F_{\text{отр.}} \quad (15)$$

Оценим теперь доли энергии деформации, накопленные установочной пластиной и реберными костями в процессе обвалки, приняв для реберной коробки величину  $m=18$  и рассчитав адгезионное усилие в соответствии с соотношением:

$$R_{\text{адг}} = L * q, \quad (16)$$

где

$L$  – длина линии отрыва мягкой ткани от единичной реберной кости,

$q$  – экспериментально найденное значение напряжения адгезионной прочности отрыва мягкой (пленочной соединительной) ткани от поверхности кости.

$$q = 3248 \text{ Па} * \text{м}.$$

Для эллиптического поперечного сечения реберной кости можно принять [3]:

$$L = 0,5\pi \left[ 1 + \frac{1}{4} \left( \frac{a_K - b_K}{a_K + b_K} \right)^2 + \frac{1}{64} \left( \frac{a_K - b_K}{a_K + b_K} \right)^4 + \dots \right] = a_K \varepsilon. \quad (17)$$

Для  $\frac{a_k}{b_k} = \frac{17,36}{6,3} = 0,363$ ;  $\varepsilon = 2,261$ ; таким образом:

$$L=39,1*10^{-3}\text{м.}$$

Тогда

$$P_{\text{адг}}=L*q= 39,1*10^{-3}\text{м}*3248 \text{ Па}*м=127 \text{ Па.}$$

Усилие “Р” на толкателе может быть найдено из уравнения равновесия сил (4):

$$P=2m*P_{\text{адг.}} \quad (18)$$

Для имеющихся числовых значений физических параметров обвалочной установки получаем конструктивную величину рабочего усилия профильного толкателя:

$$P=2*18*127=4572 \text{ (Н).}$$

В соответствии с уравнением (15) энергоемкость базовой пластины и реберной коробки составят:

$$U_{\text{пл}} = \frac{P_{\text{адг}}^2 * E_{\text{пл}} l_{\text{пл}}}{96 * (E_k / k)^2} l^3 = \frac{127^2 * 2 * 10^{11} * 0,3 * 10^{-9} * 0,3^3}{96 * (2,4 * 10^9 * 3,41 * 10^{-9})^2} = \frac{13064,49}{6429,8742} = 2,03 \text{ (Дж).}$$

Определим энергоемкость костей реберной коробки:

$$U_k = m * P_{\text{адг}} * F_{\text{отр.}} = 18 * 127 * 1,04 * 10^{-2} = 23,77 \text{ (Дж)}$$

Как видим, доля энергоемкости установочной пластины в общей энергоемкости процесса обвалки составляет около 8%.

Таким образом совершенно очевидно, что чрезвычайно перспективным направлением совершенствования процесса механизированной обвалки и конструкции обвалочной установки является снижение энергоемкости базовой установочной пластины.

Из первого слагаемого уравнения(15) вытекает, что энергия деформации наиболее чувствительной является в отношении длины “l” установочной пластины(в третьей степени).

Поэтому из энергетического описания процесса обвалки реберных костей следует теоретически, научно обоснованное техническое решение, связанное с изготовлением установочной пластины в виде отдельных, шарнирно соединенных между собой, самостоятельно работающих на изгиб секций



количеством “t” и шириной в “t” раз уже, всей ширины пластины. В этом случае соотношение (8) примет вид:

$$U = U_{пл} + U_k = t * \frac{Радг^2 * E_{пл} l_{пл}}{96 * (E_k I_k)^2 t^2} + m * Радг * F_{отр}. \quad (19)$$

Величина энергоемкости базовой пластины приобретает форму:

$$U_{пл} = \frac{Радг^2 * E_{пл} l_{пл}}{96 * (E_k I_k)^2 t^2}. \quad (20)$$

Как видим, такое техническое решение позволяет снизить энергоемкость установочной пластины в “t<sup>2</sup>” раз.

Таким образом, выполнив установочную пластину не цельной, а в виде, например  $t=10$ , отдельных шарнирно соединенных между собой полос шириной  $\frac{l_{пл}}{t} = \frac{0,3м}{10} = 0,03м = 30мм$  каждая, удастся снизить энергоемкость базовой пластины в  $t^2=100$  раз.

При этом общая суммарная энергоемкость процесса обвалки реберного мяса сокращается с величины  $U=25,8(Дж)$  до величины  $U=23,79(Дж)$ , то есть на 7,9%.

### Список литературы:

1. Ю.Н.Работнов. Сопротивление материалов. - М., Физматгиз, 1962 г., 456 с.
2. М.И.Любошиц, Г.М.Ицкович. Справочник по сопротивлению материалов. Минск, «Вышэйш. Школа», 1969. 464 с.
3. И.И.Алиев. Краткий справочник по математике. - М.: ИП РадиоСофт, 2006. - 192 с.
4. С.П.Тимошенко. Сопротивление материалов. М., Наука, 1965 г., 364 с.
5. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теория упругости. М., Наука, 1965 г., 204 с.