

УДК 664.692.5

В. Я. ГРУДАНОВ, А. Б. ТОРГАН, П. В. СТАНКЕВИЧ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СОСТАВНЫХ МАТРИЦАХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МАКАРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Белорусский государственный аграрный технический университет

(Поступила в редакцию 27.02.2014)

Введение. В настоящее время для Республики Беларусь достаточно остро стоит проблема снижения удельных энергозатрат на производство продукции, что актуально для пищевой промышленности. На пищевых предприятиях Республики Беларусь для изготовления макаронных изделий применяются комплексные автоматизированные линии, в состав которых входят: дозаторы сырья, пресс, сушилка, охладитель и бункеры промежуточного хранения готового продукта.

Современный пресс для изготовления изделий состоит из смесителя с системами дозирования муки и воды, прессующего устройства (шнека), матрицы и механизма для резки выпрессованного полуфабриката [1].

Конструкция матрицы является одним из определяющих факторов, влияющим на технико-экономические показатели работы прессы. Матрица включает в себя цилиндрический корпус с колодцами, расположенными на концентрических окружностях, установленные внутри колодцев вкладыши со сквозными формующими отверстиями, сгруппированными в гнезда.

Однако в данной конструкции матрицы не решены вопросы, связанные с компенсацией температурных деформаций ее рабочей поверхности: в процессе работы корпус матрицы нагревается и расширяется. Это можно объяснить с позиции механической теории теплоты, поскольку при нагревании молекулы или атомы вещества начинают двигаться быстрее. В твердых телах атомы начинают с большей амплитудой колебаться вокруг своего среднего положения в кристаллической решетке и им требуется больше свободного пространства. В результате тело (в нашем случае матрица) расширяется и деформируется, что приводит к короблению рабочей поверхности матрицы, при этом зазор между корпусом матрицы и вращающимся ножом становится неодинаковым по всей площади рабочей поверхности матрицы. Это обуславливает неравномерное обрезаемое вращающимся ножом отформованных макаронных изделий (различная длина, превышающая нормы по СТБ 1963–2009), выходящих из формующих отверстий, и ухудшение качества готовой продукции, а, следовательно, и снижение производительности прессы за счет отходов, причем увеличиваются удельные затраты энергии.

Дифференциальное уравнение теплопроводности. Для улучшения конструкции матрицы необходимо рассмотреть основные закономерности тепловых процессов, целесообразно проанализировать дифференциальное уравнение теплопроводности, используя метод [2].

Выделим в матрице (она представляет однородное и изотропное тело) элементарный параллелепипед объемом dV с ребрами dx , dy и dz . Плотность ρ , теплоемкость c и теплопроводность λ считаем одинаковыми во всех точках параллелепипеда и они не изменяются во времени. Принимаем, что температура на левой грани $dydz$ равна t , температура на противоположной грани $dydz$ равна $t + \frac{dt}{dx} dx$ (рис. 1).

Необходимо отметить, что количество теплоты, входящее через соответствующую грань параллелепипеда, не равно количеству теплоты, выходящему через противоположную грань, так как

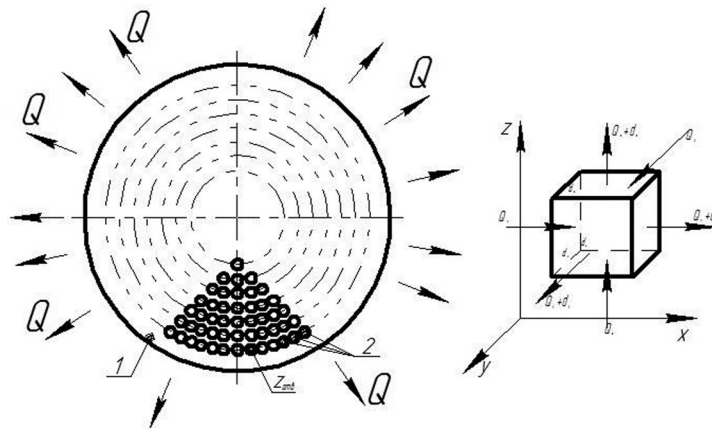


Рис. 1. К выводу основных закономерностей процесса теплопроводности: 1 – корпус матрицы; 2 – формирующие отверстия; $Z_{отв}$ – количество формирующих отверстий; Q – количество теплоты. Стрелками показано направление тепловых потоков

часть теплоты идет на повышение температуры в объеме параллелепипеда (в нашем случае фильеры).

Количество теплоты, входящее в параллелепипед через его грани за промежуток времени $d\tau$: по оси x через грань $dydz$, по оси y через грань $dx dz$ и по оси z через грань $dx dy$:

$$Q_x = -\lambda \frac{dt}{dx} dydzd\tau; \quad Q_y = -\lambda \frac{dt}{dy} dx dzd\tau; \quad Q_z = -\lambda \frac{dt}{dz} dx dyd\tau.$$

Количество теплоты, выходящее из параллелепипеда через противоположные грани за тот же промежуток времени по осям x, y, z :

$$\begin{aligned} Q_{x+dx} &= -\lambda \frac{dt}{dx} dydzd\tau + \left[-\lambda \frac{d}{dx} \left(\frac{dt}{dx} \right) dx dy dz d\tau \right]; \\ Q_{y+dy} &= -\lambda \frac{dt}{dy} dx dzd\tau + \left[-\lambda \frac{d}{dy} \left(\frac{dt}{dy} \right) dy dx dz d\tau \right]; \\ Q_{z+dz} &= -\lambda \frac{dt}{dz} dx dyd\tau + \left[-\lambda \frac{d}{dz} \left(\frac{dt}{dz} \right) dz dx dy d\tau \right]. \end{aligned}$$

Определим разность между количествами теплоты, вошедшей и вышедшей из параллелепипеда за промежуток времени $d\tau$, соответственно по осям x, y, z :

$$\begin{aligned} dQ_x &= Q_x - Q_{x+dx} = \lambda \frac{d^2 t}{dx^2} dx dy dz d\tau; \quad dQ_y = Q_y - Q_{y+dy} = \lambda \frac{d^2 t}{dy^2} dy dx dz d\tau; \\ dQ_z &= Q_z - Q_{z+dz} = \lambda \frac{d^2 t}{dz^2} dz dx dy d\tau. \end{aligned}$$

Общее приращение теплоты в параллелепипеде за время $d\tau$ составит

$$dQ = dQ_x + dQ_y + dQ_z = \lambda \left(\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{d^2 t}{dy^2} + \frac{d^2 t}{dz^2} \right) dx dy dz d\tau.$$

Так как $dx dy dz = dV$, получим

$$dQ = \lambda \left(\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{d^2 t}{dy^2} + \frac{d^2 t}{dz^2} \right) dV d\tau.$$

Выражение в скобках является оператором Лапласа $\Delta^2 t$ или

$$dQ = \lambda \Delta^2 t dV d\tau. \quad (1)$$

По закону сохранения энергии приращение количества теплоты в объеме параллелепипеда равно количеству теплоты, расходуемому на изменение энтальпии этого объема:

$$dQ = c\rho dV \frac{dt}{d\tau} d\tau. \quad (2)$$

Здесь $\frac{dt}{d\tau} d\tau$ – изменение температуры объема за время $d\tau$.

Приравняв уравнения (1) и (2), получаем

$$c\rho dV \frac{dt}{d\tau} d\tau = \lambda \Delta^2 t dV d\tau.$$

Принимаем $dt / d\tau = a$ и произведя сокращения, окончательно получаем

$$\frac{dt}{d\tau} = a \Delta^2 t. \quad (3)$$

Уравнение (3) показывает распределение температуры в любой точке матрицы, благодаря которому теплота передается от фильер теплопроводностью. Уравнение (3) является дифференциальным уравнением теплопроводности в неподвижной матрице, а именно уравнением Фурье, в котором a – коэффициент температуропроводности, характеризующий теплотехнические свойства матрицы.

Уравнения (1)–(3) описывают распределение температур при передаче теплоты теплопроводностью в самом общем виде, в частности, без учета формы тела, через которое проводится теплота. Для конкретных условий данные уравнения должны быть дополнены граничными условиями, характеризующими геометрические факторы. В дальнейшем необходимо рассмотреть процесс теплопроводности стенки фильеры.

Теплопроводность цилиндрической стенки фильеры. Построение математической модели. Рассмотрим однородную цилиндрическую стенку фильеры длиной (высотой) h с внутренним r_1 и внешним r_2 радиусами. Коэффициент теплопроводности материала фильеры λ постоянный. Внутренняя и внешняя поверхности имеют определенные температуры t_1 и t_2 , причем $t_1 > t_2$ и температура изменяется только в радиальном направлении r (рис. 2).

Температурное поле в данном случае будет одномерным, а изотермические поверхности – цилиндрическими, имеющими с фильерой общую ось. Выделим внутри стенки кольцевой слой радиусом r и толщиной dr , ограниченный изотермическими поверхностями.

Тогда, согласно закону Фурье, количество теплоты, проходящее в единицу времени через этот слой, равно

$$Q = -\lambda S \frac{dt}{dr} = -2\lambda\pi r h \frac{dt}{dr} \quad \text{или} \quad dt = -\frac{Q}{2\pi\lambda h} \frac{dr}{r}. \quad (4)$$

После интегрирования уравнения (4) получаем

$$t = -\frac{Q}{2\pi\lambda h} \ln r + C. \quad (5)$$

При $r = r_1, t = t_1, r = r_2, t = t_2$, исключив постоянную C , находим расчетную формулу

$$Q = \frac{2\pi\lambda h}{\ln \frac{r_2}{r_1}} (t_1 - t_2) = \frac{2\pi\lambda h}{\ln \frac{d_2}{d_1}} (t_1 - t_2) = \frac{\pi h (t_1 - t_2)}{2\lambda \ln \frac{d_2}{d_1}}. \quad (6)$$

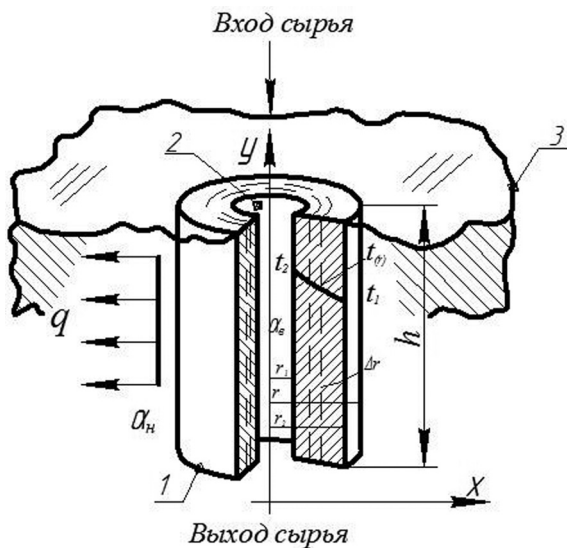


Рис. 2. Схема одномерного процесса теплопроводности цилиндрической стенки фильеры: 1 – стенка фильеры; 2 – формирующее отверстие; 3 – матрица; t_1 – температура на наружной поверхности фильеры; t_2 – температура на внутренней поверхности фильеры; r – радиус слоя стенки; r_1 – радиус внутренней стенки; r_2 – радиус наружной стенки; h – высота (длина) фильеры; q – направление теплового потока; Δr – толщина слоя стенки; α_v – коэффициент теплоотдачи от тестовой массы к стенке; α_n – коэффициент теплоотдачи от стенки фильеры к матрице

Отнесем количество теплоты Q , проходящее через стенку фильеры, к единице длины (высоты).

Тогда уравнение (6) принимает вид

$$q_h = \frac{Q}{h} = \frac{\pi \Delta t}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}},$$

где q_h – плотность теплового потока.

Поскольку внутренняя и внешняя поверхности фильеры имеют различные площади, то разными будут и значения плотностей тепловых потоков q_1 и q_2 : $q_1 = \pi d_1 q_2$ или $d_1 q_1 = d_2 q_2$.

Уравнение температурной кривой внутри однородной цилиндрической стенки можно получить из уравнения (5). Подставляя значения Q и C , имеем

$$t_r = t_1 - \frac{Q}{2\pi\lambda h} \ln \frac{d_2}{d_1} = t_1 - \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \ln \frac{d_x}{d_1}.$$

Таким образом, при $\lambda = \text{const}$ температура изменяется по логарифмическому закону.

Построение математической модели. Для получения уравнения, описывающего распространение теплового потока, определим количество теплоты Δq Вт, проходящее через слой стенки толщиной Δr (рис. 2). Согласно закону Фурье,

$$q = -\lambda S \frac{dt}{dr},$$

где S – площадь сечения, м^2 , перпендикулярного к тепловому потоку, т. е. $S = 2\pi R h$, м^2 , h – высота фильеры, м.

Количество теплоты, которое идет на нагревание фильеры до температуры t , можно определить по формулам

$$\Delta q = c\rho\Delta V(t - t_1),$$

где c – удельная теплоемкость, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; V – объем, м^3 ; t_1 – температура окружающей среды;

$$\Delta q = c\rho 2\pi r h \Delta r (t - t_1).$$

Согласно закону Фурье,

$$\Delta q = -\lambda S \frac{dt(r)}{dr} + \lambda S(r + \Delta r) \frac{dt(r + \Delta r)}{dr} = 2\pi\lambda h \left[(r + \Delta r) \frac{dt(r + \Delta r)}{dr} - r \frac{dt(r)}{dr} \right] =$$

$$= 2\pi\lambda h \left(r \frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{dt}{dr} \right) \Delta r. \quad (7)$$

Приравнивая первые части выражений для Δq и сокращая их на $2\pi\lambda h \Delta r$, получаем

$$r \frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{dt}{dr} - \frac{c\rho}{\lambda} r(t - t_1) = 0,$$

где $c\rho / \lambda > 0$.

Таким образом, получено аналитическое выражение для нахождения температуры в разных по глубине участках цилиндрической стенки фильеры, если известна температура на внутренней стенке, т. е. $t(r_0) = t_0$. При этом использовался метод [3].

Внутри цилиндра (фильеры) находится теплоноситель с большей температурой (тестовая масса) t_1 и коэффициентом теплоотдачи от него к внутренней поверхности стенки фильеры α_B . Снаружи фильеры (матрицы) находится более холодный теплоноситель, имеющий температуру t_2 . При этом коэффициент теплоотдачи от наружной стенки фильеры (матрицы) к более холодному теплоносителю (окружающей среде) – α_H (рис. 3).

Тогда количество теплоты, передаваемой от тестовой массы к внутренней стенке фильеры, составляет

$$Q = \alpha_B S \tau (t_1 - t_{ст1}) = \alpha_B 2\pi r h (t_1 - t_{ст1}). \quad (8)$$

Количество теплоты, проходящее сквозь стенку фильеры путем теплопроводности, находим в соответствии с уравнением (6):

$$Q = \frac{2\lambda\pi h}{2,31 \lg \frac{r_H}{r_B}} (t_{ст1} - t_{ст2}). \quad (9)$$

Количество теплоты, передаваемое от стенки фильеры в окружающую среду:

$$Q = \alpha_H S_H (t_{ст2} - t_2) = \alpha_H 2\pi h r_H \tau (t_{ст2} - t_2). \quad (10)$$

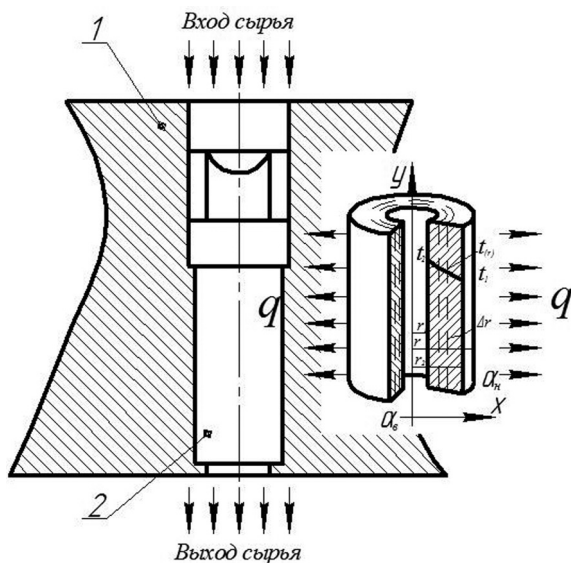


Рис. 3. К выводу уравнения теплопередачи цилиндрической стенки фильеры: 1 – корпус матрицы; 2 – формирующая вставка-фильера; q – тепловой поток; α_B – коэффициент теплоотдачи от тестовой массы к стенке фильеры; α_H – коэффициент теплоотдачи от наружной стенки фильеры в окружающую среду

Преобразовав уравнения (8)–(10), получим

$$Q \left(\frac{1}{\alpha_B r_B} + \frac{1}{\lambda} 2,3 \lg \frac{r_H}{r_B} + \frac{1}{\alpha_H r_H} \right) = 2\pi h \tau (t_1 - t_2),$$

или

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_B r_B} + \frac{1}{\lambda} 2,3 \lg \frac{r_H}{r_B} + \frac{1}{\alpha_H r_H}} 2\pi h \tau (t_1 - t_2).$$

При $h = 1$ определим

$$Q = K_R 2\pi \tau (t_1 - t_2), \quad (11)$$

где K_R – коэффициент теплопередачи, отнесенный к единице длины.

Таким образом, нами получено уравнение, характеризующее процесс теплопередачи от тестовой массы к корпусу матрицы и учитывающее геометрические особенности фильера.

Новые технические решения. Составные матрицы с температурными зазорами. На рис. 4 представлена принципиально-конструктивная схема кольцевой матрицы с улучшенными тепло-техническими и технологическими характеристиками [4].

Матрица для производства макаронных изделий содержит цилиндрический корпус 1, основание 2, колодцы 3, расположенные внутри колодцев вкладыши 4 со сквозными формирующими отверстиями 5.

Рабочая поверхность корпуса разделена на ряд условных колец 6. Колодцы 3 расположены в условных кольцах 6 на концентрических окружностях 7. Основание 2 установлено относительно корпуса 1 матрицы с зазором 8 и имеет центральное отверстие 9.

Таким образом, корпус матрицы выполнен составным и разделенным на две неравные части по внутреннему радиусу R_B^n последнего условного кольца, если считать от радиуса корпуса матрицы.

Колодцы 3 по площади матрицы расположены в условных кольцах 6 на концентрических окружностях 7, при этом наружные радиусы условных колец определяются по формуле

$$R_H^n = (0,786)^n R_K, \quad (12)$$

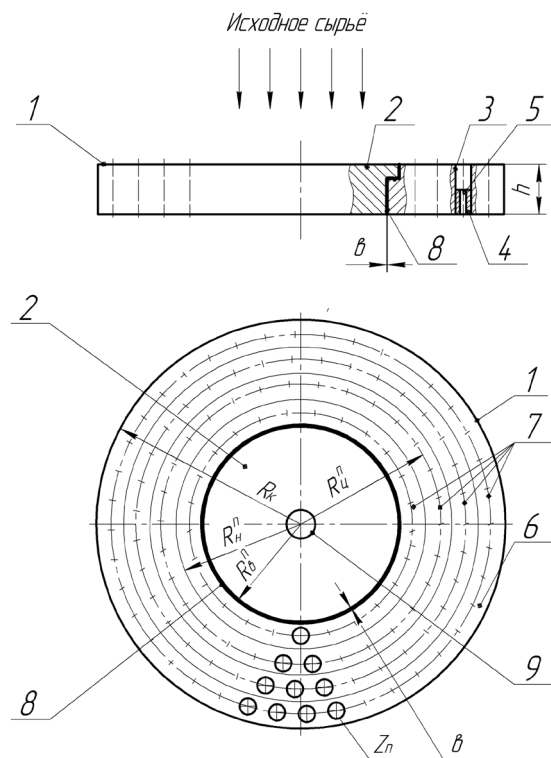


Рис. 4. Принципиально-конструктивная схема составной матрицы для производства макаронных изделий: 1 – корпус матрицы; 2 – основание; 3 – колодцы; 4 – вкладыши; 5 – формирующие отверстия; 6 – кольца условные; 7 – окружности цилиндрические; 8 – зазор; 9 – отверстие центральное; R_K – радиус корпуса матрицы; R_B^n – центральный радиус n -го условного кольца; R_H^n – наружный радиус n -го условного кольца; R_B^n – внутренний радиус n -го условного кольца; b – ширина зазора; Z_n – количество колодцев; h – высота (толщина) матрицы (по патенту 17855 РБ на изобретение)

где R_n^n – наружный радиус n -го условного кольца; R_k – радиус корпуса матрицы; n – порядковый номер условного кольца, считая от радиуса корпуса матрицы (от периферии к центру); 0,786 – коэффициент пропорциональности.

Количество колодцев на каждой концентрической окружности каждого условного кольца определяется таким образом:

$$Z_{n+1} = \left[\frac{Z_n}{1,618} \right], \quad (13)$$

где Z_n – количество колодцев на n -м условном кольце; Z_{n+1} – количество колодцев на $(n+1)$ -м условном кольце; 1,618 – коэффициент пропорциональности, квадратные скобки обозначают целую часть числа.

Основание 2 установлено относительно корпуса 1 со ступенчатым зазором 8 шириной b по всей высоте (толщине) матрицы. Стрелками показано направление движения исходного сырья. Дополнительный вариант установки основания 2 относительно корпуса 1 со ступенчатым зазором 8 шириной b через кольцевой выступ 10 (в увеличенном масштабе) изображен на рис. 5.

На рис. 6 представлена трехмерная модель составной матрицы в разобранном виде. Под матрицей устанавливается вращающийся нож для отрезания отформованных изделий (не показан). Вкладыши 4 установлены в колодцы 3 методом запрессовки. Центральное отверстие 9 обеспечивает соосность при установке матрицы и рабочего вала шнека (на рис. 6 не показан).

Устройство работает следующим образом. В шнековой камере пресса тестовая масса подвергается интенсивному механическому воздействию со стороны винтовой лопасти шнека, постепенно уплотняется, освобождается от включений воздуха, становится плотной, упругопластичной и вязкой. Уплотненная макаронная тестовая масса преодолевает сопротивление матрицы с помощью шнека и продавливается сквозь формирующие отверстия 5 вкладышей 4, установленных в колодцах 3 корпуса 1. При этом использование в конструкции формул (12) и (13) позволяет получить одинаковую пропускную способность матрицы по всей рабочей поверхности (по всем условным кольцам).

В процессе формования макаронных изделий корпус матрицы интенсивно нагревается, в результате, согласно теории линейного расширения металлов, возникают температурные деформации, причем максимальные деформации – в центральной части матрицы на осях симметрии круглого основания 2. Поскольку основание 2 выполнено в виде круга и установлено в центре матрицы, то при нагреве оно будет равномерно удлиняться (расширяться) во все стороны благодаря наличию зазора 8. Снятию максимальных температурных деформаций будет способствовать и центральное отверстие 9.

Одновременно температурным деформациям подвергается и большая периферийная часть матрицы – кольцеобразная рабочая поверхность, которая также имеет возможность линейного расширения благодаря зазору 8. В результате такого взаимного перемещения двух составных частей корпуса рабочая поверхность матрицы будет иметь минимальное коробление торцевой (рабочей) поверхности, что и обуславливает равномерное отрезание отформованных изделий вращающимся (подрезным) ножом.

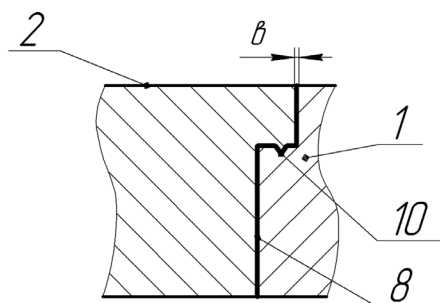


Рис. 5. Вариант установки основания в корпусе матрицы: 1 – корпус матрицы; 2 – основание; 3–7, 9 – см. рис. 4; 8 – зазор; 10 – выступ; b – ширина температурного зазора

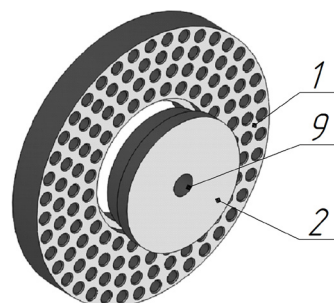


Рис. 6. Трехмерная модель составной матрицы: 1 – корпус матрицы (большая часть); 2 – основание матрицы (меньшая часть); 3–8 – см. рис. 4; 9 – центральное отверстие

Таким образом, зазор δ позволяет компенсировать температурные деформации и получить минимальное коробление рабочей поверхности матрицы и в этом случае вращающийся подрезной нож (на рис. 5 не показан) будет отрезать отформованные изделия одинаковой длины.

Расчетное обоснование тепловых параметров составных матриц. Наибольшее распространение в промышленности получили матрицы для формования макарон и вермишели, выполненные в виде диска диаметром от 298 до 600 мм, толщиной (высотой) $h = 50\text{--}140$ мм, изготовленные из нержавеющей стали 1Х18Н9Т, латуни ЛС59-1 или бронзы БрАЖЭ-4 и установленные в поточных линиях (в прессах). В процессе работы поточной линии матрицы создают значительное гидравлическое сопротивление, на преодоление которого затрачивается огромная механическая энергия, переходящая в теплоту трения и обуславливающая значительный нагрев конструкции (до $120\text{ }^\circ\text{C}$) [5].

Согласно теории линейного расширения металлов, увеличение длины металлического стержня при нагревании определяется по следующей формуле:

$$\Delta l = \alpha' l (t - 5), \quad (14)$$

где Δl – увеличение длины металлического стержня при нагреве, м; α' – относительное удлинение стального стержня (прутка) длиной 1 м (для стали $\alpha' = 1,2 \cdot 10^{-5}$); l – исходная длина стержня, м; t – температура нагрева металлического стержня, $^\circ\text{C}$.

В процессе работы корпус матрицы может нагреваться до $80\text{--}110\text{ }^\circ\text{C}$, Δl – ширина зазора δ в данной конструкции матрицы. Для определения оптимальной величины (ширины) зазора δ приведем пример А.

Пример А. Дано: диаметр матрицы $l = 500$ мм, температура нагрева корпуса $t = 105\text{ }^\circ\text{C}$, тогда $\Delta l = b = \alpha' l (t - 5)$ м, $b = 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 0,5(105 - 5) = 0,6$ мм, т. е. ширина b зазора δ должна быть 0,6 мм.

В процессе эксплуатации и нагрева конструкции матрицы при температурных деформациях основание 2 расширяется и как бы запрессовывается в корпус 1 матрицы. Благодаря взаимным перемещениям основания 2 (меньшая часть матрицы) и корпуса 1 (большая часть матрицы) зазор δ полностью исчезает, что предотвращает протекание тестовой массы через него. Уплотнение может быть надежной, если использовать соединение корпуса 1 и основания 2 через кольцевой выступ (рис. 5). При этом зазор δ выполнен ступенчатым по всей высоте (толщине) матрицы. Это позволяет установить основание 2 в одной горизонтальной плоскости с корпусом 1.

Отметим, что величина коробления рабочей поверхности матрицы (зона расположения колодцев) будет обусловлена, прежде всего, материалом корпуса в зависимости от коэффициента теплопроводности: для нержавеющей стали $\lambda = 46$ Вт/(м·К); для бронзы $\lambda = 83$ Вт/(м·К); для латуни $\lambda = 110,7$ Вт/(м·К).

Следовательно, меньшее значение коэффициента теплопроводности приводит к максимальному короблению, а его наибольшая величина – к минимальному короблению. Это означает, что для стальных матриц зазор b должен быть больше, чем для бронзовых и латунных матриц.

При минимальном короблении матрицы нож равномерно скользит по всей плоскости корпуса, благодаря тому, что меньшая часть корпуса выполнена в виде диска диаметром d :

$$d = \frac{D}{2}, \quad (15)$$

где d – диаметр меньшей части корпуса; D – диаметр корпуса.

Использование зависимости (15) позволяет получить одинаковое относительное изменение длины ΔL в направлении диаметра как большей части корпуса, так и его меньшей части при нагревании на температуру ΔT в соответствии с основным законом теплового расширения тел по формуле

$$\Delta L = \alpha L \Delta T, \quad (16)$$

где ΔL – относительное изменение длины; α – коэффициент линейного теплового расширения; L – первоначальная длина тела; ΔT – изменение температуры при нагревании.

Найдем относительное изменение длины большей и меньшей частей корпуса матрицы согласно выражению (16). Обозначим ΔL_6 – относительное изменение длины большей части корпуса (в направлении диаметра матрицы); ΔL_M – относительное изменение длины меньшей части корпуса (в направлении диаметра диска).

Принимаем для обеих частей корпуса $\Delta L = \text{const}$, т. е. $\Delta L_6 = \Delta L_M$, $\alpha = \text{const}$ (материал составных частей корпуса одинаковый), L_6 – длина большей части корпуса в направлении диаметра, L_M – длина меньшей части корпуса в том же направлении;

$$\begin{aligned}\Delta L_6 &= \alpha L_6 \Delta T_6; \\ \Delta L_M &= \alpha L_M \Delta T_M.\end{aligned}$$

Так как $d = D/2$, то $L_6 = L_M$ при $\Delta L_6 = \Delta L_M$, что в реальных условиях означает одинаковое и минимально возможное коробление обеих частей корпуса и как результат – качественная работа вращающегося ножа и равномерное отрезание отформованных макаронных изделий, что соответствует требованиям стандарта.

Пример Б. Дано: диаметр матрицы $D = 500$ мм – длина стержня; температура нагрева корпуса $\Delta T = 105$ °С. Для меньшей части корпуса при использовании уравнения (15) $d = D/2 = L_M = 500/2 = 250$ мм; $\Delta L_M = \alpha L_M \Delta T = 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 250 \cdot 100 = 0,3$ мм; для большей части $L_6 = 500 - 250$ мм и $\Delta L_6 = \alpha L_6 \Delta T = 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 250 \cdot 100 = 0,3$ мм. Тогда $\Delta L_M = \Delta L_6$, а общая величина зазора $b = 0,6$ мм.

Результаты расчета показывают, что обе части корпуса расширяются на одну и ту же величину, равную 0,3 мм, что необходимо для качественной работы вращающегося ножа.

На основании расчетных и справочных данных можно принять, что ширина b зазора δ может приниматься в диапазоне 0,3–0,6 мм.

Область применения составных матриц. Данное техническое решение может иметь конкретное практическое применение. Так, например, в настоящее время на филиале «Боримак» УП «Борисовский комбинат хлебопродуктов» ОАО «Минскоблхлебпром» эксплуатируются две поточные линии для производства макаронных изделий с использованием 25 матриц итальянской фирмы Landucci (рис. 7). Основным недостатком данных матриц – коробление рабочей поверхности.

Из рис. 7 видно, что предлагаемое техническое решение в полной мере применимо к матрицам итальянской фирмы, которые в процессе работы коробятся, что приводит к некачественному отрезанию полуфабрикатов режущим механизмом, особенно в зоне расположения периферийных формирующих отверстий.

Заключение. Впервые рассмотрены тепловые процессы, протекающие в матрицах при формировании макаронных изделий, выведено дифференциальное уравнение теплопроводности,



Рис. 7. Общий вид матриц производства итальянской фирмы Landucci

являющееся уравнением Фурье и показывающее распределение температуры в любой точке корпуса, изучена теплопроводность цилиндрической стенки фильеры и построена ее математическая модель. Последняя позволяет определять температуру в разных по глубине участках стенки вкладыша-фильеры при известной температуре тестовой массы, получены уравнения теплоотдачи и теплопередачи, характеризующие процесс теплопередачи от тестовой массы к корпусу матрицы с учетом геометрических особенностей фильер.

Представлено новое направление в конструировании матриц (в частности, составные круглые матрицы с температурными компенсаторами) и дано расчетное обоснование их теплотехнических параметров. На новые конструкции матриц получен патент 17855 на изобретение РБ и два положительных решения на выдачу патентов.

Литература

1. Назаров, Н. И. Технология макаронных изделий: Учебн. для вузов; 2-е изд, перераб. и доп. М., 1978.
2. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М., 1971.
3. Скатецкий, В. Г. Математическое моделирование физико-химических процессов. Мн., 1981.
4. Матрица для производства макаронных изделий: Пат. 17855 Республики Беларусь. МПК А21С 11/16 / В. Я. Груданов, В. М. Поздняков, А. А. Бренч, П. В. Станкевич; заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»; заявл. 21.04.2011, опубликовано 30.12.2013.
5. Медведев, Г. М. Технология макаронного производства: Учебн. для вузов. М., 1998.

V. Ya. GRUDANOV, A. B. TORHAN, P. V. STANKEVICH

MODELLING OF THERMAL PROCESSES OF MACARONI FOODS ROUND MOULDS

Summary

The article states the basis laws of thermal processes of macaroni foods round moulds. The differential equation of thermal conductivity shows temperature allocation in any area of the mould. The thermal conductivity of the cylindrical die side has been examined. The mathematical model allows considering the temperature of different sections of the die side when the temperature of paste is known. The presentation of a new design of composite moulds with the temperature sensing elements and their rated basis, practical application is stated.