

**В.Я. Груданов, А.Б. Торган, И.Е. Дацук, П.В. Станкевич**

*Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,  
г. Минск, Республика Беларусь*

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕСТА НА ПРОЧНОСТЬ, ЖЕСТКОСТЬ И ПРОГИБ КРУГЛЫХ МАТРИЦ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МАКАРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ**

**Аннотация.** В статье приводятся преимущества высокотемпературного режима замеса и формования макаронных изделий, при этом нагрев корпуса матриц достигает 110–120 °С, что обуславливает значительные температурные деформации (прогиб) рабочей поверхности. Показано применение теории упругости в температурных деформациях пластин для двух случаев: 1) температура корпуса матрицы меняется по толщине пластины; 2) температура корпуса матрицы меняется в радиальном направлении. При этом получены теоретические формулы для определения кривизны шаровой изогнутой поверхности, изгибающих моментов и наибольших температурных напряжений. Приведены результаты экспериментальных исследований по определению прогиба (коробления) опытных образцов круглых пластин толщиной 2, 3 и 4 мм и диаметром 300 мм в двух исполнениях: сплошных и составных. Получены экспериментальные формулы для определения прогиба сплошных и составных пластин, установлено, что зависимость прогиба пластин от степени нагрева носит полиномиальный характер. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что круглые составные матрицы (пластины) из-за наличия сквозного концентрического зазора имеют меньший прогиб срединной поверхности, повышенную жесткость и усиленную прочность корпуса. Новые технические решения на составные матрицы защищены патентами РБ на изобретения № 17855, 18195, 19138 и 21246.

**Ключевые слова:** матрица, температура теста, высокотемпературный режим замеса, теория упругости, прогиб срединной поверхности, температурные напряжения, переменный радиус, относительная деформация, изгибающие моменты, составная матрица, температурный концентрический зазор, цилиндрическая жесткость, модуль упругости

**V.Ya. Grudanov, A.B. Torgan, I.E. Datsuk, P.V. Stankevich**

*The Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus*

## **INFLUENCE OF TEST TEMPERATURE ON STRENGTH, RIGIDITY AND BENDING OF ROUND MATRIXES FOR PRODUCTION OF PASTA**

**Abstract.** The article presents the advantages of high-temperature kneading and molding of pasta, while the heating of the matrix body reaches 110–120 °С, which causes significant temperature deformation (deflection) of the working surface. The application of the theory of elasticity in the temperature deformations of plates is shown for two cases: — the temperature of the matrix body varies along the plate thickness; — the temperature of the matrix body changes in the radial direction, while theoretical formulas are obtained for determining the curvature of a spherical curved surface, bending moments and the highest temperature stresses. The results of experimental studies to determine the deflection (warping) of prototypes of round plates with a thickness of 2, 3 and 4 mm and a diameter of 300 mm in two versions: solid and composite. Experimental formulas are obtained for determining the deflection of continuous and composite plates, while the dependence of the deflection of the plates on the degree of heating is polynomial. It is theoretically grounded and experimentally confirmed that round composite matrices (plates), due to the presence of a through concentric gap, have a smaller deflection of the middle surface, increased rigidity and enhanced strength of the housing. New technical solutions for composite matrices are protected by patents of the Republic of Belarus for inventions No. 17855, 18195, 19138 and 21246.

**Keywords:** matrix, test temperature, high temperature kneading, elasticity theory, deflection of the middle surface, temperature stresses, variable radius, relative deformation, bending moments, composite matrix, temperature concentric gap, cylindrical stiffness, elastic modulus

**Введение.** Известно, что традиционные режимы замеса и резания технологического полуфабриката допускают повышение температуры теста перед матрицей до 50–55 °С, исходя из того, что при больших температурах происходят денатурация белковых веществ, потери связующих свойств клейковины, следовательно, ослабление структуры макаронных изделий. Однако, денатурация белка, связанная с деструкцией белковых молекул, происходит в большей степени за счет механического трения шнека об уплотненную тестовую массу и интенсивного смещения внутренних слоев теста, т.е. в результате перетира теста. Поэтому были проведены исследования возможностей использования высокотемпературных режимов замеса (ВТРЗ) макаронного теста [1].

Нагрев макаронного теста перед его уплотнением в шнековой камере пресса увеличивает пластичность и текучесть теста, что приводит к росту скорости выпрессовывания изделий, т.е. к росту производительности пресса. Это характерно и для температур, превышающих 50–55 °С, которые ранее считали оптимальными для достижения наибольшей производительности шнекового пресса. Однако при температуре замеса теста выше 65–70 °С наблюдается заметное снижение варочных свойств макаронных изделий в результате ослабления клейковинной массы структуры изделий. Поэтому оптимальной, по мнению Г.М. Медведева, температурой макаронного теста после замеса на шнековых прессах является температура около 60 °С, с тем, чтобы перед матрицей она составила не более 65 °С с учетом прироста температуры теста в шнековой камере при таких условиях замеса примерно на 5 °С. Такой режим называется высокотемпературным режимом замеса [2].

Высокотемпературный режим замеса макаронного теста наряду с сохранением качества изделий дает следующие преимущества по сравнению с традиционным низкотемпературным режимом замеса:

- ♦ на 10–15 % увеличивается производительность пресса;
- ♦ предотвращается выпрессовывание белесых изделий вследствие повышения пластичности теста;
- ♦ не требуется расхода воды на охлаждение шнековой камеры, сокращается продолжительность сушки изделия;
- ♦ улучшается цвет изделий в результате частичной тепловой инактивации фермента полифенолоксидазы.

Здесь важно отметить, что при прохождении полуфабриката через матрицу без тефлоновых вставок минимальные потери сухих веществ установлены при температуре матрицы 110–120 °С, так как изделия имеют абсолютно гладкую поверхность. В целом увеличение температуры матрицы с 45–50 до 100–110 °С снижает продолжительность варки изделия до готовности с 8–9 до 6–7 мин и увеличивает прочность сваренных изделий на срез с 60–80 до 100–120 кПа.

Вместе с тем следует подчеркнуть, что при переходе на высокотемпературный режим формования и нагрева матрицы до 110–120 °С, ее корпус подвергается значительным температурным деформациям, которые проявляются, прежде всего, в прогибе (выпучивании) срединной рабочей поверхности (до 5 мм), что увеличивает процент отходов в виде концов [3].

**Предварительные сведения. Теория упругости, основные положения и допущения. Новые технические решения.** Теория упругости имеет целью аналитическое изучение напряженно-деформированного состояния упругого тела. С помощью теории упругости могут быть проверены решения, полученные с использованием допущений сопротивления материалов, и установлены границы применимости этих решений. Иногда разделы теории упругости, в которых рассматривается вопрос о пригодности детали, но с использованием достаточно сложного математического аппарата (расчет пластин, оболочек, массивов), относится к прикладной теории упругости.

В математической линейной теории упругости исходят из следующих допущений:

- ♦ о непрерывности (сплошности) среды;
- ♦ о естественном состоянии, на основании которого начальное напряженное (деформированное) состояние тела не учитывается;
- ♦ об однородности, на основании чего предполагается, что состав тела одинаков во всех точках;
- ♦ о шаровой изотропности, на основании которого считается, что механические свойства материала одинаковы по всем направлениям;
- ♦ об идеальной упругости, на основании которого предполагается полное исчезновение деформации после снятия нагрузки;
- ♦ о линейной зависимости между составляющими деформациями и напряжениями.

При решении задач теории упругости пользуются теоремой о единственности решения: если заданные поверхностные и объемные силы находятся в равновесии, им соответствует одна единственная система напряжений и перемещений.

При решении задач теории упругости также часто пользуются принципом Сен-Венана: если внешние силы, приложенные на небольшом участке упругого тела, заменить действующей на том же участке статически эквивалентной системой сил, то эта замена вызовет лишь изменение внешних деформаций.

**Новые технические решения.** Основы теории упругости рассмотрим применительно к новой конструкции матриц для производства макаронных изделий. На рис. 1 представлена трехмерная модель составной матрицы.

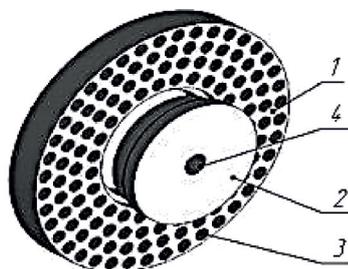


Рис. 1. Трехмерная модель составной матрицы: 1 — корпус матрицы; 2 — основание матрицы; 3 — формующие колодцы; 4 — центральное отверстие

Fig. 1. 3D model of the composite matrix: 1 — matrix body; 2 — matrix base; 3 — wells; 4 — center hole

Как видно из рис. 1 составная матрица состоит из двух частей: большей, имеющей вид кольца и меньшей, выполненной в виде круглого основания, при этом меньшая часть устанавливается внутри большей со сквозным ступенчатым зазором, а колодцы с формующими механизмами расположены только на большей, кольцевой части и расположены по концентрическим окружностям.

Для установления влияния температуры теста на прочность, жесткость и прогиб составной матрицы воспользуемся допущениями теории упругости и заменим корпус матрицы круглой пластиной.

**Теория упругости в температурных деформациях матрицы (пластины). Построение математических моделей.** Температура в какой-либо точке круглой пластины является функцией двух переменных: радиуса  $x$  и расстояния  $z$  от точки до срединной плоскости. В силу линейности основных уравнений для температурных деформаций, напряжения, вызванные радиальным изменением температуры ( $tx_2 - tx_1$ ) и изменением температуры по толщине ( $t_2 - t_1$ ), можно вычислить отдельно, а затем алгебраически суммировать.

Рассмотрим два случая изменения температуры:

1. Температура одинакова для всех точек, расположенных на одинаковом расстоянии  $z$  от срединной плоскости, но меняется по толщине пластины по прямолинейному закону.

2. Температура постоянна по толщине, не зависит от полярного угла  $\theta$ , но меняется в зависимости от расстояния  $x$  между точкой и центром пластины [3, 4, 5].

Первая модель. При одинаковом во всех точках пластины  $\Delta t = t_2 - t_1$ , подчиняющемся прямолинейному закону (рис. 2), перемещение этих точек пластины, связанное с ее расширением или сжатием, происходит также одинаково по всем направлениям в плане.

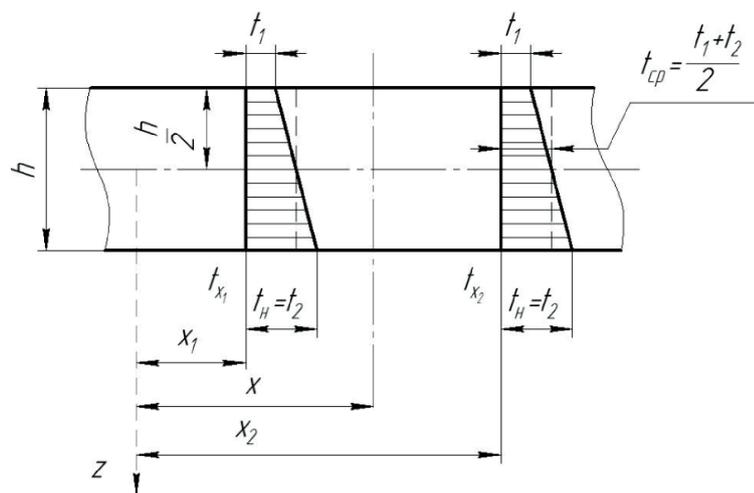


Рис. 2. Изменение температуры корпуса матрицы по толщине

Fig. 2. The temperature change of the matrix body thickness

В случае повышения температуры нижняя поверхность пластины получает большее расширение, чем верхняя и пластина изгибается по шаровой поверхности радиусом  $\rho$  выпуклостью вниз.

На основании допущения о прямых нормалях можно считать, что относительная деформация  $\varepsilon$  (по отношению к срединному слою) происходит по наружной поверхности в любом направлении.

$$\varepsilon = \left( \frac{z}{\rho} \right)_{z=\frac{h}{2}} = \frac{h}{2\rho}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — кривизна изогнутой поверхности;  $h$  — толщина матрицы (пластины).

С другой стороны, относительная температурная деформация  $\varepsilon$  отрезка длиной  $l$  на наружной поверхности по отношению к срединному слою:

$$\varepsilon = \frac{alt_n - alt_{cp}}{l} = a(t_n - t_{cp}) = a\left(t_2 - \frac{t_2 + t_1}{2}\right) = a\left(\frac{t_2 - t_1}{2}\right) = a\frac{\Delta t}{2}, \quad (2)$$

где  $a$  — температурный коэффициент линейного расширения материала пластины;  $l$  — длина отрезка пластины;  $t_n = t_2$  — температура наружной поверхности матрицы;  $t_{cp}$  — средняя температура матрицы;  $t_1$  — температура поверхности матрицы со стороны подачи теста;  $\Delta t$  — разность температур  $t_2 - t_1$ .

Приравняв выражение (1) и (2), можно получить формулу для определения кривизны шаровой изогнутой поверхности:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{a\Delta t}{h}. \quad (3)$$

Если пластина закреплена, на контуре возникнут погонные изгибающие моменты  $M_r$ , уничтожающие кривизну, вызванную неравномерным нагревом.

При сферическом изгибе моментами  $M_r$ , кривизна:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_r}{D(1+\mu)}, \quad (4)$$

где  $M_r$  — погонный изгибающий момент;  $D$  — цилиндрическая жесткость матрицы;  $\mu$  — коэффициент Пуассона для материала матрицы.

Приравняв выражения (3) и (4), получим формулу для определения погонного изгибающего момента:

$$M_r = \frac{D(1+\mu)a\Delta t}{h},$$

а разделив это выражение на момент сопротивления (для круглой пластины  $W = \frac{\pi d^3}{32}$ ) и подставив

значение цилиндрической жесткости  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ , определим наибольшее напряжение:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_r}{W} = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \cdot \frac{(1+\mu)a\Delta t}{h} \cdot \frac{32}{\pi d^3} = \frac{8Eh^2(1+\mu)a\Delta t}{3(1-\mu^2)\pi d^3}, \quad (5)$$

где  $W$  — момент сопротивления матрицы.

Вторая модель. Круглая пластина подвергается действию температуры, имеющей радиальный переход (рис. 3) на большей части пластины.

В дальнейшем  $t_{(x)}$  обозначим для краткости  $t$ , напряженное состояние пластины считаем плоским, т.е. полагаем  $\sigma_z = 0$  в силу симметрии условий и расчетной схемы перемещения  $u$  зависят только от радиуса  $x$ , а перемещения  $v$  равны нулю. Поэтому относительные деформации:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{du}{dx} = \frac{1}{E}(\sigma_r - \mu\sigma_T) + at \\ \varepsilon_T &= \frac{u}{x} = \frac{1}{E}(\sigma_T - \mu\sigma_r) + at \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где  $\sigma_r$  — радиальное нормальное напряжение;  $\sigma_T$  — окружное нормальное напряжение.

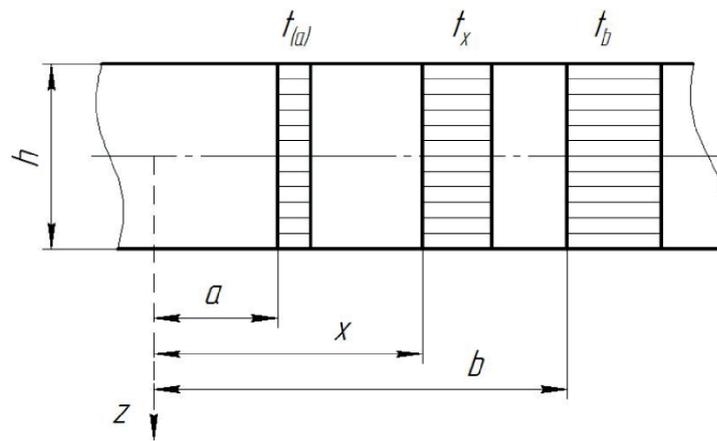


Рис. 3. Схема круглой пластины с радиальным изменением температуры  
Fig. 3. Scheme of a circular plate with a radial temperature change

Если решить первые два уравнения (6) относительно  $\sigma_r$  и  $\sigma_T$  можно получить:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1-\mu^2} \left[ \frac{du}{dx} + \mu \frac{u}{x} - (1+\mu)at \right] \\ \sigma_T &= \frac{E}{1-\mu^2} \left[ \frac{u}{x} + \mu \frac{du}{dx} - (1+\mu)at \right] \\ \tau_{rT} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Подстановка значений (7) в уравнение равновесия  $\Sigma_r = 0$  плоской задачи в полярных координатах, принимающее в данном случае ( $\rho = x$ ) вид

$$\frac{d\sigma_r}{dx} - \frac{\sigma_r - \sigma_T}{x} = 0$$

приводит к следующему дифференцированному уравнению для радиального перемещения:

$$\frac{d^2u}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{du}{dx} - \frac{u}{x^2} = (1+\mu)a \frac{dt}{dx}.$$

Для интегрирования этого уравнения левая его часть записывается так:

$$\frac{d}{dx} \left[ \frac{1}{x} - \frac{d}{dx}(xu) \right] = (1+\mu)a \frac{dt}{dx}. \quad (8)$$

Первое и второе интегрирование (8) дает

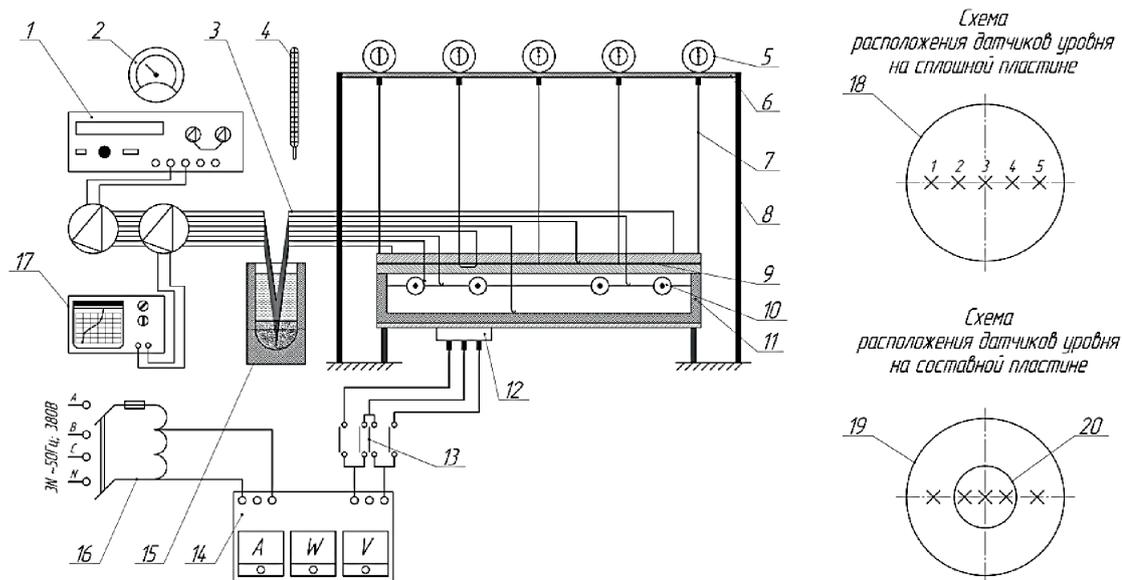
$$u = \frac{(1+\mu)a^x}{x} \int_a^x t(x_1) dx_1 + \frac{1}{2} C_1 x + \frac{C_2}{x}. \quad (9)$$

В выражении (9) через  $x_1$  обозначен переменный радиус, определяющий точки, расположенные между  $a$  и  $x$ . Если подставить это выражение в формулы (7), то получатся следующие выражения для температурных напряжений:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{Ea^x}{x^2} \int_a^x t(x_1) x_1 dx_1 + \frac{EC_1}{2(1-\mu)} - \frac{EC_2}{2(1+\mu)x^2} \\ \sigma_T &= \frac{Ea^x}{x^2} \int_a^x t(x_1) x_1 dx_1 - Eat(x) + \frac{EC_1}{2(1-\mu)} + \frac{EC_2}{(1+\mu)x^2} \\ \tau_{rT} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Постоянные  $C_1$  и  $C_2$  определяются из граничных условий на контурах пластины. Если отверстия радиусом  $a$  в пластине нет, то интегрирование в формулах (10) выполняется в пределах от нуля до  $x$  [6, 7, 8].

**Экспериментальные исследования температурных напряжений в круглых матрицах и обсуждение их результатов.** Для подтверждения теоретических предпосылок, изложенных выше, был разработан, изготовлен и налажен экспериментальный стенд, установленный в научно-исследовательской лаборатории кафедры технологий и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции. На рис. 4 представлена принципиально-конструктивная схема экспериментального стенда для исследования температурных деформаций опытных образцов круглых пластин.



**Рис. 4.** Схема экспериментального стенда для исследования температурных деформаций круглых пластин: 1 — милливольтметр Щ-31; 2 — барометр; 3 — термопары; 4 — термометр; 5 — датчик уровня ИЧ-10МК; 6 — тепловая изоляция; 7 — удлинительные стержни; 8 — опора; 9 — рабочая поверхность электроконфорки; 10 — нагревательные элементы; 11 — тепловая изоляция; 12 — клеммная колодка; 13 — пакетный переключатель; 14 — комплект приборов К-505; 15 — сосуд Дьюара; 16 — трансформатор; 17 — электронный потенциометр КСН-4; 18 — пластина круглая сплошная; 19 — пластина круглая составная; 20 — температурный зазор

**Fig. 4.** Scheme of an experimental stand for studying the temperature deformations of round plates: 1 — millivoltmeter SH-31; 2 — barometer; 3 — thermocouples; 4 — thermometer; 5 — level sensor ICH-10MK; 6 — thermal insulation; 7 — extension rods; 8 — support; 9 — working surface of the electric burner; 10 — heating elements; 11 — thermal insulation; 12 — terminal block; 13 — packet switch; 14 — a set of devices K-505; 15 — Dewar vessel; 16 — transformer; 17 — electronic potentiometer KSN-4; 18 — a round solid plate; 19 — round composite plate; 20 — temperature gap

Основу стенда составляет нагревательное устройство, в качестве которого была использована электроконфорка — нагревательная плита ЛАБ-ПН-01 с рабочей поверхностью из алюминийевого сплава, предназначенная для безопасного нагрева опытных образцов круглых пластин. Данный тип плиты обеспечивает равномерное распределение температуры по всей рабочей поверхности, при этом нагревательный элемент изолирован и позволяет быстро разогреть платформу до 400 °С, а электронный терморегулятор поддерживает температуру рабочей поверхности с точностью до ± 5 °С.

Технические характеристики нагревательной плиты ЛАБ-ПН-01:

1. Максимальная температура нагрева 400 °С.
2. Разница температур по платформе, не более ± 5°С.
3. Размеры нагревательной платформы 430 x 310 мм.
4. Размеры лотка (для ЛАБ-ПН-01 Б) 430 x 310 x 50 мм.
5. Потребляемая мощность 2600 Вт.
6. Материал платформы алюминий.
7. Габаритные размеры (без лотка) 470 x 460 x 130 мм.
8. Масса 15 кг.

Над рабочей поверхностью электроконфорки через удлинительные стержни установлены датчики уровня ИЧ-10МК часового типа, предназначенные для измерения линейных размеров абсолютным и относительным методами, определения величины отклонений от заданной геометрической формы и взаимного расположения поверхностей (коробления).

Для измерения температуры рабочей поверхности плиты был использован прибор АК ИП-9303 — инфракрасный (ИК) бесконтактный радиационный термометр для промышленного и бытового применения (пирометр). Данный тип прибора широко применяется в пищевой индустрии для оценки термических процессов.

Для наведения на объект в приборе применяется одноточечный лазерный целеуказатель.

С помощью прибора АК ИП-9303 можно бесконтактно измерять температуру объекта до +535 °С при базовой погрешности ± 2 %.

Одновременно температура плитного настила контролировалась термопарами с клеммной головкой типа ТХА-1199/15 с диаметром горячего спая 1,5 мм при длине монтажной части 800–1000 мм.

На рис. 5 показан общий вид экспериментального стенда. В качестве опытных образцов были использованы круглые пластины толщиной 2, 3 и 4 мм и диаметром 100, 200 и 300 мм в двух вариантах: сплошные и разрезные (составные), изготовленные из нержавеющей стали 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-72).

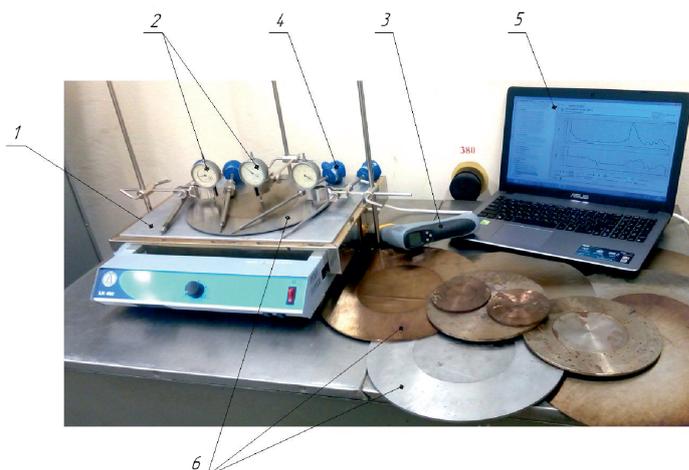


Рис. 5. Общий вид экспериментального стенда: 1 — нагревательные элементы (плита электрическая типа ЛАБ-ПН-01); 2 — индикатор часового типа ИЧ-10МК; 3 — измеритель температуры АК ИП-9303; 4 — термопары ТХА-1199/15; 5 — компьютер ASUS-X550C; 6 — пластины (опытные образцы)

Fig. 5. General view of the experimental stand: 1 — heating elements (electric stove type LAB-PN-01); 2 — indicator of the sentry type ICh-10MK; 3 — temperature meter AKIP-9303; 4 — thermocouples TXA-1199/15; 5 — computer ASUS-X550C; 6 — plates (prototypes)

Цель проведения экспериментальных исследований — определить влияние температурных зазоров на величину коробления (прогиба) поверхности пластины.

Обработка, обобщение и систематизация экспериментальных данных выявила следующие закономерности.

На рис. 6 представлены обобщенные данные по экспериментальному нагреву пластины сплошной 2, 3 и 4 мм при наружном диаметре  $D = 300$  мм.

Из графиков (рис. 6) следует, что с увеличением толщины пластины прогиб ее срединной поверхности от воздействия температуры уменьшается. Так, например, при толщине пластины 2 мм с увеличением температуры нагрева конфорки от 100 до 400 °С ее прогиб изменяется с 0,12 до 0,31 мм; при толщине пластины 3 мм и росте температуры от 100 до 400 °С прогиб изменяется от 0,054 до 0,25 мм, а при толщине пластины 4 мм и увеличении температуры от 100 до 400 °С прогиб изменяется от 0,05 до 0,18 мм.

Характер графиков описывается полиномиальной зависимостью, а именно:

- при толщине сплошной пластины толщиной 2 мм:

$$\sigma = 0,0025t^2 + 0,0525t + 0,0575;$$

- при толщине сплошной пластины толщиной 3 мм:

$$\sigma = 0,0025t^2 + 0,0635t + 0,0125;$$

- при толщине сплошной пластины толщиной 4 мм:

$$\sigma = 0,0075t^2 + 0,0095t + 0,0375.$$

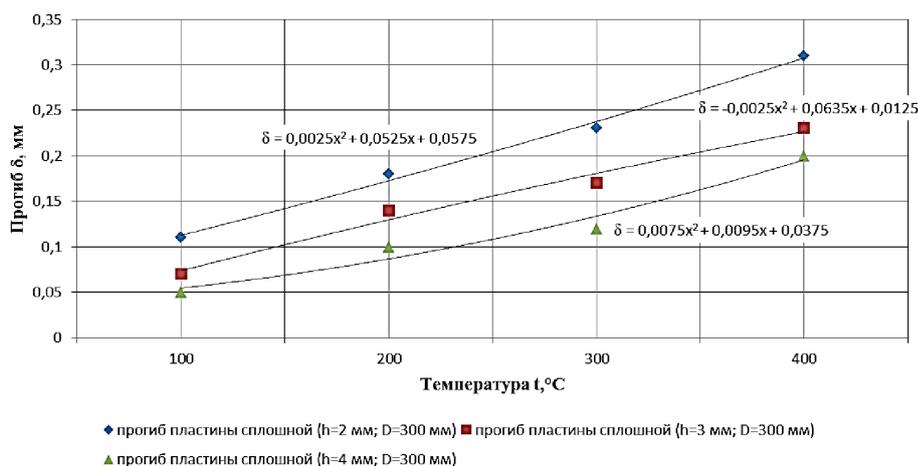


Рис. 6. Экспериментальная зависимость прогиба сплошной пластины от степени нагрева  
 Fig. 6. Experimental dependence of the deflection of a continuous plate on the degree of heating

Одновременно были проведены экспериментальные исследования составных пластин с наружным диаметром D = 300 мм и толщиной 2, 3 и 4 мм. На рис. 7 представлены графические обобщенные данные по нагреву составных пластин.

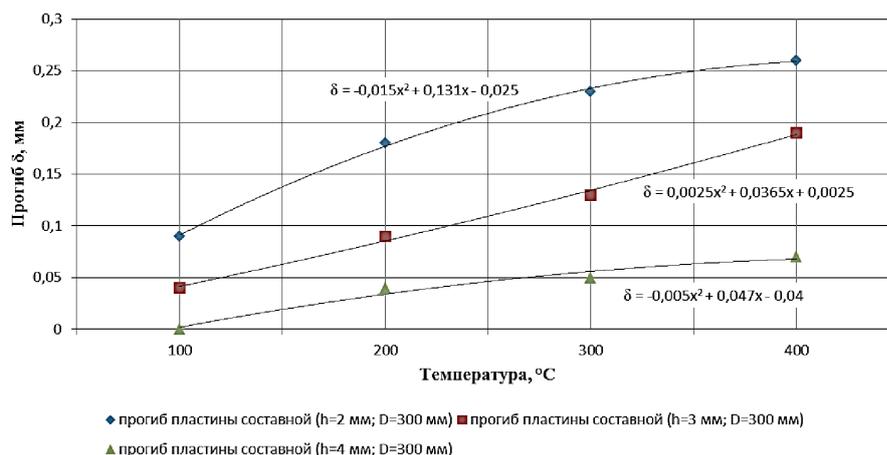


Рис. 7. Экспериментальная зависимость прогиба составных пластины от степени нагрева  
 Fig. 7. Experimental dependence of the deflection of composite plates on the degree of heating

Из рис. 7 следует, что составные пластины благодаря наличию температурного концентрического зазора подвержены значительно меньшим тепловым деформациям, при этом характер кривых более точно описывается также полиномиальной зависимостью, а именно:

- ♦ при толщине составной пластины толщиной 2 мм:

$$\delta = 0,015t^2 + 0,131t - 0,025;$$

- ♦ при толщине составной пластины толщиной 3 мм:

$$\delta = 0,0025t^2 + 0,0365t - 0,0025;$$

- ♦ при толщине составной пластины толщиной 4 мм:

$$\delta = 0,005t^2 + 0,047t - 0,04.$$

Сравнение экспериментальных данных и их анализ показывает, что наличие зазора снижает прогиб составных пластин:

- ♦ при толщине 2 мм и температуре нагрева 400 °C с 0,31 до 0,26 мм;
- ♦ при толщине 3 мм и температуре нагрева 400 °C с 0,28 до 0,18 мм;
- ♦ при толщине 4 мм и температуре нагрева 400 °C с 0,18 до 0,05 мм.

Таким образом, экспериментальным путем установлено положительное влияние температурного зазора на снижение тепловых деформаций в пластинах, в частности на снижение величины коробления — прогиба срединной поверхности.

**Заключение.** Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что круглые составные матрицы (пластины) из-за наличия сквозного концентрического зазора имеют меньший прогиб рабочей поверхности, повышенную жесткость и усиленную прочность корпуса, одновременно сквозной зазор снижает температурные деформации рабочей (нижней) поверхности корпуса матрицы, т.е. оказывает явно положительный эффект на процесс формования макаронных изделий.

Впервые получены эмпирические полиномиальные уравнения для определения прогиба срединной поверхности матрицы в зависимости от температуры нагрева и толщины корпуса.

Новые конструкции составных матриц целесообразно использовать в прессах технологических линий зарубежных фирм Италии, Швейцарии, Австрии, Франции и др., в которых установлены круглые матрицы с наружным диаметром 520 и 610 мм и толщиной соответственно 110 и 140 мм — для таких матриц вопросы прогиба срединной рабочей поверхности корпуса особенно актуальны.

Новые технические решения на составные матрицы защищены патентами на изобретения РБ №№ 17855, 18195, 19138 и 21246 [9, 10, 11, 12].

### Список использованных источников

1. Назаров, Н.И. Технология макаронных изделий: учебник для вузов / Н.И. Назаров. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Пищевая промышленность, 1978. — 286 с.
2. Медведев, Г.М. Технология макаронного производства: учебник для вузов / Г.М. Медведев. — М.: Колос, 1998. — 272 с.
3. Сергеев, Б.М. Расчеты на прочность деталей машин пищевых производств / Б.М. Сергеев. — М.: Машиностроение, 1969. — 143 с.
4. Алфутов, Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем / Н.А. Алфутов. — М.: Машиностроение, 1978. — 312 с.
5. Муштарп, Х.М. Средний изгиб пологой оболочки, прямоугольной в плане и опирающейся на гибкие в своей плоскости ребра / Х.М. Муштарп // Известия КФАН СССР, сер. физ.-матем. и техн. наук. — 1958. — № 12.
6. Корнишик, М.С. О выборе выражений для касательных составляющих перемещения при решении задач теории оболочек вариационными методами / М.С. Корнишик // Известия КФАН СССР, сер. физ.-матем. и техн. наук. — 1958. — № 12.
7. Ганеева, М.С. Большие прогибы прямоугольных пластин под действием равномерного нормального давления при неравномерном нагреве / М.С. Ганеева // Тр. конф. по теории пластин и оболочек. — 1961. — вып. 1. — С. 101–106.
8. Levy, S. Large Deflection Theory for Rectangular Plates / S. Levy // Proceedings of Symposia in Applied Mathematics. — 1949. — Vol. 1.
9. Матрица для производства макаронных изделий: Пат. 17855 Республики Беларусь. МПК А21С11/16 / 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 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэл. уласн. — 2013. — № 12.
10. Матрица для производства макаронных изделий: Пат. 18195 Республики Беларусь. МПК А21С11/16 / В.Я. Груданов, В.М. Поздняков, А.А. Бренч, П.В. Станкевич; заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»; заявл. 28.09.2011, опубликовано 29.01.2014 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэл. уласн. — 2014.
11. Матрица для производства макаронных изделий: Пат. 19138 Республики Беларусь. МПК А21С11/16 / В.Я. Груданов, В.М. Поздняков, А.А. Бренч, П.В. Станкевич; заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»; заявл. 27.01.2012, опубликовано 30.04.2015.
12. Матрица для производства макаронных изделий: Пат. 21246 Республики Беларусь. МПК А21С11/16 / В.Я. Груданов, А.Б. Торган, П.В. Станкевич; заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»; заявл. 16.02.2016, опубликовано 26.07.2018.

### References

1. Nazarov, N.I. Technology of pasta: a textbook for high schools / N.I. Nazarov. — 2nd ed., Revised. and add. — M.: Food Industry, 1978. — 286 p. (in Russian).
2. Medvedev, G.M. Technology of pasta production: a textbook for high schools / G.M. Medvedev. — M.: Kolos, 1998. — 272 p. (in Russian).

3. Sergeev, B.M. Strength calculations of parts of food production machines / B.M. Sergeev. — M. : Mechanical Engineering, 1969. — 143 p. (in Russian).
4. Alfutov, N.A. The basics of calculating the stability of elastic systems / N.A. Alfutov. — M.: Mechanical Engineering, 1978. — 312 p. (in Russian).
5. Mushtarp, H.M. The average bend of a gentle shell, rectangular in plan and resting on ribs flexible in its plane / Kh.M. Mushtarp // Izvestiya KFAN USSR, ser. Phys.-Math. andtech. sciences. — 1958. — No. 12 (in Russian).
6. Kornishik, M.S. On the choice of expressions for tangent components of displacement in solving problems of shell theory by variational methods / M.S. Kornishik // Izvestiya KFAN SSSR, ser. Phys.-Math. and tech. sciences. — 1958. — No. 12 (in Russian).
7. Ganeeva, M.S. Large deflections of rectangular plates under the action of uniform normal pressure during uneven heating / M.S. Ganeeva // Tr. conf. on the theory of plates and shells. — 1961. — issue 1, p. 101–106. № 12 (in Russian).
8. Levy, S. Large Deflection Theory for Rectangular Plates / S. Levy // Proceedings of Symposia in Applied Mathematics. — 1949. — Vol. 1.
9. Matrix for the production of pasta: Pat. 17855 of the Republic of Belarus. IPC A21C11 / 16 / V.Ya. Grudanov, V.M. Pozdnyakov, A.A. Brench, P.V. Stankevich; applicant Education Institution «Belarusian State Agrarian Technical University»; declared 04.21.2011, published 12.30.2013 // Afitsyiny bul. / Nat. Center Intel. Sat. — 2013. — No. 12 (in Russian).
10. Matrix for the production of pasta: Pat. 18195 of the Republic of Belarus. IPC A21C11 / 16 / V.Ya. Grudanov, V.M. Pozdnyakov, A.A. Brench, P.V. Stankevich; applicant Education Institution «Belarusian State Agrarian Technical University»; declared 09.28.2011, published 01.29.2014 // Afitsyiny bul. / Nat. Center Intel. Sat. — 2014 (in Russian).
11. Matrix for the production of pasta: Pat. 19138 of the Republic of Belarus. IPC A21C11 / 16 / V.Ya. Grudanov, V.M. Pozdnyakov, A.A. Brench, P.V. Stankevich; applicant Education Institution «Belarusian State Agrarian Technical University»; declared 01.27.2012, published 04.30.2015 (in Russian).
12. Matrix for the production of pasta: Pat. 21246 of the Republic of Belarus. IPC A21C11 / 16 / Grudanov V.Ya., A.B. Torgan, P.V. Stankevich; applicant Education Institution «Belarusian State Agrarian Technical University»; declared 02.16.2016, published 07.26.2018 (in Russian).

#### Информация об авторах

*Груданов Владимир Яковлевич* — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (пр-т Независимости, 99, 220124, г. Минск, Республика Беларусь).

*Торган Анна Борисовна* — кандидат технических наук, доцент кафедры технологий и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (пр-т Независимости, 99, 220124, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: anechkat@tut.by.

*Дацук Игорь Евгеньевич* — старший преподаватель кафедры технологий и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (пр-т Независимости, 99, 220124, г. Минск, Республика Беларусь) E-mail: Datsukigor@gmail.com.

*Станкевич Павел Витальевич* — аспирант кафедры технологий и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (пр-т Независимости, 99, 220124, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Boginy@tut.by.

#### Information about authors

*Grudanov Vladimir Y.* — D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of Technology and Logistics Processes, Processing of Agricultural Products, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti, 220124, Minsk, Republic of Belarus).

*Torhan Anna B.* — Ph.D, (Engineering), Assistant Professor of Technology and Logistics Processes, Processing of Agricultural Products, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti, 220124, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: anechkat@tut.by.

*Datsuk Igor E.* — Senior Lecturer of Technology and Logistics Processes, Processing of Agricultural Products. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti, 220124, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Datsukigor@gmail.com.

*Stankevich Pavel V.* — graduate student of the department of technologies and technical support of the processing of agricultural products, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti, 220124, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Boginy@tut.by.