

539.34 (043)

Х 207

На правах рукописи

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
С С С Р

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

Харитончик  
Александр Ефимович

О ВЛИЯНИИ ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА УСТОЙ-  
ЧИВОСТЬ И ВЫНУЖИВАНИЕ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СИСТЕМ

Специальность 01.02.08 - "Сопротивление материалов и  
строительная механика"

05.23.17

Автореферат диссертации на  
искание ученой степени  
кандидата технических наук

ЧПИ

Челябинск  
1973

539.344 (043)

Работа выполнена на кафедре "Сопротивление материалов"  
Челябинского политехнического института им.Ленинского комсо-  
мola.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор  
Д.А.ГОХФЕЛЬД.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Ю.Р.ЛЕПИК;  
кандидат технических наук, доцент  
В.А.ИКРИН.

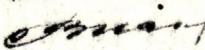
Ведущее предприятие - Челябинский тракторный завод имени  
В.И.Ленина.

Автореферат разослан " 6 " февраля 1973 г.  
Защита диссертации состоится " 7 " марта 1973 г.  
в 15 часов в аудитории 428 на заседании Ученого Совета  
по присуждению ученых степеней инженерно-строительного  
факультета Челябинского политехнического института имени  
Ленинского комсомола ( 454044, Челябинск - 44, проспект  
им.В.И.Ленина, 76).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Челябинского политехнического института им.Ленинского  
комсомола.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересу-  
ющихся темой диссертации, принять участие в заседании  
Ученого Совета по присуждению ученых степеней инженерно-  
строительного факультета при Челябинском политехническом  
институте им.Ленинского комсомола или прислать отзыв в  
двух экземплярах, заверенных гербовой печатью.

Ученый секретарь Совета  
кандидат технических наук, доцент

 В. Капранов/

В различных отраслях современной техники находят широкое применение процессы, протекающие в весьма сложных температурных условиях. Температурные воздействия, которые испытывают теплоизоляционные элементы конструкций, оказывают многообразное влияние на их работоспособность. Среди многочисленных аспектов такого влияния важное место занимают вопросы, связанные с устойчивостью первоначальной формы конструктивных элементов и их выпучиванием при возникновении неравномерных температурных полей, а также в случае действия периодически изменяющейся тепловой нагрузки.

Можно привести значительное количество примеров из разных областей техники, свидетельствующих о том, что при температурных воздействиях даже без влияния какой-либо механической нагрузки наблюдается интенсивное выпучивание конструктивных элементов, представляющее в некоторых случаях опасность для работоспособности конструкции. Для обоснованного решения вопроса о возможности функционирования тонкостенных элементов конструкций (пластин, оболочек) в заданных температурных условиях необходимо располагать сведениями о величинах критических температур, соответствующих различным возможным формам потери устойчивости таких элементов при температурных воздействиях, а также иметь представление о их поведении в случае действия повторных тепловых нагрузок.

Указанные аспекты проблем термоустойчивости и термовыпучивания отражены в реферируемой работе, которая посвящена анализу неосесимметричных форм потери устойчивости кольцевых пластин при осесимметричном нагреве и изучению различных механизмов прогрессирующего выпучивания, наблюдающегося при теплосменах в отсутствии внешних механических нагрузок.

Исследование устойчивости кольцевых пластин, испытывающих осесимметричный нагрев, представляет интерес при определении склонности к термическому короблению тонкостенных деталей, имеющих кольцевую форму (закалочное выпучивание дисковых фрез, коробление дисков сцепления муфт поворота гусеничных машин при нагреве, обусловленном трением, коробление уплотнительных элементов газовых турбин и т.д.). Проблема выпучивания теплоизоля-

женных элементов конструкций при повторных тепловых воздействиях является весьма актуальной в ряде отраслей современной техники.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, выводов, списка литературы и приложения.

Во введении дан обзор работ, в которых изучается устойчивость кольцевых и круглых пластин в условиях осесимметричного нагрева, рассмотрены различные подходы к проблеме выпучивания деформируемых систем при повторном нагружении, сформулированы конкретные цели и задачи исследования.

В настоящее время детально исследована устойчивость осесимметрично нагретых кольцевых и круглых пластин в предположении осесимметричной потери устойчивости. Анализ устойчивости плоской формы равновесия таких пластин в большинстве исследований (работы Попкова В.Г., Григолюка Э.И., Балабуха Л.И. и Шаповалова Л.А., Надаи, Даса, Поповича В.Е.) выполнен в линейной постановке при упругом деформировании материала без учета влияния температуры на его физико-механические характеристики. В том случае, если нагреваемая пластина имеет значительную изгибную жесткость потеря устойчивости плоской формы равновесия ее может произойти при упруго-пластическом деформировании материала. Целесообразность использования при исследовании устойчивости упруго-пластического равновесия осесимметрично нагретых круглых пластин подходов, применяющихся при решении задач о предельном равновесии идеально пластических элементов типа пластин и оболочек, показана Ю.Р.Лепиком.

При рассмотрении одной лишь осесимметричной формы потери устойчивости круглых и кольцевых пластин оценка критической температуры может оказаться завышенной, так как выпучивание может возникнуть при меньшем значении критической температуры, соответствующей возникновению неосесимметричной формы равновесия пластины. Особенно вероятно появление неосесимметричных форм потери устойчивости в случае неравномерного нагрева кольцевых пластин, когда один или оба края свободны от кинематических связей. В связи с этим представляет интерес исследование

устойчивости кольцевых пластин, имеющих один или два свободных края, при воздействии осесимметричных температурных полей без использования предположения об осесимметричном характере формы потери устойчивости.

Среди исследований, посвященных анализу неосесимметричных форм потери устойчивости кольцевых пластин при различных видах нагружения (работы Бареевой Г.Н. и Лазарева Л.Д., Фельдмана А.А., Газизова Б.Г., Мэнсфилда, Ямаки, Гуркина Г.С., Поповича В.Е.) отметим исследования двух последних авторов, в которых рассматриваются температурные задачи. В работе, выполненной Г.С.Гуркиным, сделана попытка оценить величину критического перепада температуры для упругой кольцевой пластины, имеющей свободный наружный край и защемление на внутреннем контуре, при степенном законе распределения температуры вдоль радиуса с помощью метода Галеркина. В.Е. Попович указал на возможность использования метода последовательных приближений при исследовании неосесимметричных форм потери устойчивости осесимметрично нагретых кольцевых пластин. Поскольку в исследованиях указанных авторов отсутствует сравнительный анализ различных форм потери устойчивости кольцевых пластин при воздействии неравномерного вдоль радиуса температурного поля, представляет интерес рассмотрение этого вопроса. Учитывая, что такой анализ весьма трудоемок и может быть осуществлен лишь в случае применения ЭВМ, предварительно необходимо решить вопрос о выборе конкретного метода исследования, наиболее приспособленного для решения поставленной задачи с помощью современных вычислительных средств.

С целью выяснения пригодности различных методов исследования устойчивости неравномерно нагретых кольцевых пластин для организации автоматизированных вычислений в первой главе проведен сравнительный анализ следующих методов, соответствующих статическому и энергетическому подходам к решению рассматриваемых в диссертационной работе задач:

- 1) метода Фробениуса,
- 2) метода последовательных приближений.

- 3) метода Галёркина,
- 4) метода конечных разностей,
- 5) метода Ритца.

В результате сопоставления алгоритмов вышеуказанных методов установлено, что наиболее эффективными с рассматриваемой точки зрения являются метод Ритца и метод конечных разностей при использовании процедуры прогонки.

Для решения конкретных задач об устойчивости осесимметрично нагруженных кольцевых пластин, имеющих один или два свободных края, в реферируемой работе применен метод Ритца. При этом учитывалось следующее.

1) С помощью метода Ритца можно получить одностороннюю оценку величин критического перепада температуры; при использовании других методов вопрос об оценке полученного приближенного решения остается открытым.

2) При составлении программы расчетов на ЭВМ, если применяется метод Ритца, объем предварительной работы меньше, чем в случае применения методов Фробениуса, последовательных приближений или конечных разностей.

3) При выборе системы координатных функций в случае использования метода Ритца не нужно удовлетворять таким жестким требованиям, как, например, при применении метода Галеркина; в результате облегчается построение указанной системы функций.

4) Если найдено решение, соответствующее определенному числу координатных элементов, отыскание менее точного решения (например, для оценки сходимости последовательных приближений) может быть выполнено с использованием результатов уточненного решения.

Во второй главе диссертации приведено математическое описание этапов решения задачи об устойчивости кольцевой пластины, вдоль радиуса которой возникает перепад температуры; описана программа решения указанной задачи на ЭВМ "Урал-2", приведены результаты решения ряда конкретных задач, в которых рассмотрены неосесимметричные формы потери устойчивости осесимметрично нагруженных кольцевых пластин; указан простой приближенный способ

оценки величины критического радиального перепада температуры для свободных кольцевых пластин, пригодный как в пределах, так и за пределами упругости; представлена данные экспериментального исследования устойчивости плоской формы равновесия кольцевых пластин в условиях осесимметричного нагрева.

Во всех известных к настоящему времени исследованиях, посвященных анализу устойчивости неравномерно нагретых круговых и кольцевых пластин, принимается, что закон распределения температуры в радиальном направлении можно аппроксимировать однопараметрической зависимостью. Аналогичный подход использован и в реферируемой работе.

Для пластин, наружный край которых при нагреве имеет более высокую температуру, принят следующий закон:

$$T(r) = \Delta T \left( \frac{r - R_1}{R_2 - R_1} \right)^q, \quad (1)$$

где  $\Delta T$  – перепад температуры между краями пластины;

$R_1, R_2$  – радиус отверстия и наружный радиус.

В том случае, когда более нагрет внутренний край, использована следующая аппроксимация закона распределения температуры в пластине:

$$T(r) = \Delta T \left( 1 - \frac{r - R_1}{R_2 - R_1} \right)^q. \quad (2)$$

Решение плоской задачи термоупругости для неравномерно (осесимметрично) нагретой кольцевой пластины постоянной толщины в том случае, если физико-механические характеристики материала не зависят от температуры, выражается следующим образом:

$$\sigma_r = -\frac{E\alpha}{r^2} \int_{R_1}^r T(\rho) \rho d\rho + \frac{Ec_1}{2(1-\mu)} - \frac{Ec_2}{(1+\mu)r^2}; \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E\alpha}{r^2} \int_{R_1}^r T(\rho) \rho d\rho + E\alpha T(r) + \frac{Ec_1}{2(1-\mu)} + \frac{Ec_2}{(1+\mu)r^2};$$

$$\tau_{r\theta} = 0;$$

$$u = -\frac{(1+\mu)\alpha}{r} \int_{R_1}^r T(\rho) \rho d\rho + \frac{1}{2} c_1 r + \frac{c_2}{r}.$$

Энергетический подход к использованию устойчивости кольцевой пластины, в плоскости которой возникают температурные напряжения, состоит в отыскании минимума ее потенциальной энергии при выпучивании:

$$\Pi = D \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right)^2 + (1+\mu) \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right) + \right. \\ \left. + (1-\mu) \left( \frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial r \partial \theta} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)^2 \right] r dr d\theta + \frac{\delta}{2} \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \left[ C_r \left( \frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 + C_\theta \left( \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)^2 \right] r dr d\theta. \quad (4)$$

Здесь  $D$  — цилиндрическая жесткость;

$r, \theta$  — полярные координаты;

$w$  — прогиб;

$\delta$  — толщина пластины.

Если ввести безразмерную переменную

$$Z = \frac{r - r_1}{r_2 - r_1} \quad (5)$$

и учесть, что в случае неосесимметричной потери устойчивости прогиб можно представить в виде произведения двух функций

$$w = V(Z) \cos(n\theta), \quad (6)$$

где

$$V(z) = \sum_{p=1}^m C_p F_p(z); \quad F_p(z) \quad - \text{функции, удовлетворяющие геометрическим граничным условиям задачи;}$$

$n$  — число узловых диаметров при потере устойчивости, функционал (4) примет вид квадратичной формы параметров указанного выше ряда

$$\Pi = \frac{\pi D}{2(r_2 - r_1)^2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_i c_j (\alpha_{ij} - \lambda \beta_{ij}). \quad (7)$$

Здесь

$$\lambda = \alpha \Delta T \left( \frac{r_2}{\delta} \right)^2;$$

$$\alpha_{ij} = \int_0^1 [\phi_i \phi_j y - (1-\mu)(Q_i K_j + Q_j K_i) + 2(1-\mu)\pi^2 \psi_i \psi_j y] dz;$$

$$\beta_{ij} = 2\delta \int_0^1 [N(z) F'_i F'_j y + \frac{1}{y} M(z) R^2 F_i F_j] dz; \quad (8)$$

$$\begin{aligned}\Phi &= F'' + \frac{1}{y} F' - \frac{n^2}{y^2} F; \quad \Omega = F'; \quad K = F' - \frac{n^2}{y} F; \quad \Psi = \frac{F}{y^2} - \frac{F'}{y}; \\ Y &= Z + \frac{\beta}{1-\beta}; \quad \beta = \frac{P_1}{P_2}; \quad \delta = \delta(1-\mu^2)(1-\beta)^2; \\ N(z) &= \frac{\sigma_p(z)}{\alpha \Delta T E}; \quad M(z) = \frac{\sigma_g(z)}{\alpha \Delta T E}.\end{aligned}\tag{8}$$

Проблема определения критического перепада температуры в таком случае сводится к отысканию наименьшего собственного значения матрицы

$$G = B^{-1} A, \tag{9}$$

где  $B^{-1}$  – обратная матрица коэффициентов  $\delta_{ij}$ , взятых с обратным знаком;

$A$  – матрица коэффициентов  $a_{ij}$ .

При небольшом числе используемых координатных функций для определения величины  $\lambda_{kp}$  целесообразно использовать один из численных способов отыскания наименьшего корня характеристического уравнения

$$|\alpha_{ij} + \lambda \delta_{ij}| = 0 \tag{10}$$

без предварительного преобразования его к каноническому виду. Указанный прием использовался при решении конкретных задач.

Определение критического значения параметра  $\lambda$  и форм потери устойчивости неравномерно нагретых кольцевых пластин (количество узловых диаметров, возникающих при выпучивании) производилось с рассмотрением трех типов сочетания граничных и температурных условий:

1) защемление на внутреннем контуре, наружный край пластины свободен, радиальное перемещение точек внутреннего контура отсутствует, распределение температуры соответствует выражению (1);

2) защемление на внешнем крае, внутренний край свободен, радиальное перемещение при  $R = R_2$  равно нулю; распределение температуры определяется законом (2);

3) оба края кольцевой пластины свободны от кинематических связей, распределение температуры определяется зависимос-

тью (I) ( $q = 1$ ). При решении задач, соответствующих первому и второму типу сочетания граничных и температурных условий, исследовалось влияние неравномерности распределения температуры вдоль радиуса на устойчивость пластин. С этой целью исследование проводилось для различных значений показателя  $q$  в законах (I) и (2). Аппроксимирующие ряды, с помощью которых определялись критические значения параметра  $\lambda$  в рассматриваемых задачах, имели соответственно следующий вид:

$$v = \sum_{p=1}^4 C_p (z^{-1})^{p+1}; \quad (II)$$

$$v = \sum_{p=1}^4 C_p z^{p+1}; \quad (12)$$

$$v = \sum_{p=1}^3 C_p z^{p-1}. \quad (13)$$

Коэффициент Пуассона во всех расчетах принимался равным 1/3.

Результаты решения первой из перечисленных выше задач представлены на рис. I, где кривые А, Б, В, Г, Д соответствуют значениям параметра  $q = 0, 1/2, 1, 2, 4$ . Как следует из рассмотрения графиков до значения  $\beta \approx 0,5$ , форма потери устойчивости пластины осесимметричная, при  $\beta > 0,5$  возникают неосесимметричные формы выпучивания. Отметим, что осесимметричная ветвь решения, соответствующего  $q = 0$ , хорошо согласуется с данными, полученными Э.И.Григолюком.

В диссертации приведены графики зависимости  $\lambda_{kp}$  от  $\beta$ , на которых отражены результаты решения остальных задач.

Как показали исследования, для пластин, имеющих свободный наружный край, осесимметричная форма потери устойчивости не возникает, выпучивание таких пластин происходит с образованием узловых диаметров. Наименьшее количество узловых диаметров, которое может появиться при короблении, равно двум. Такая форма характерна для пластин с небольшой величиной отношения радиусов, форма потери устойчивости свободных колы-

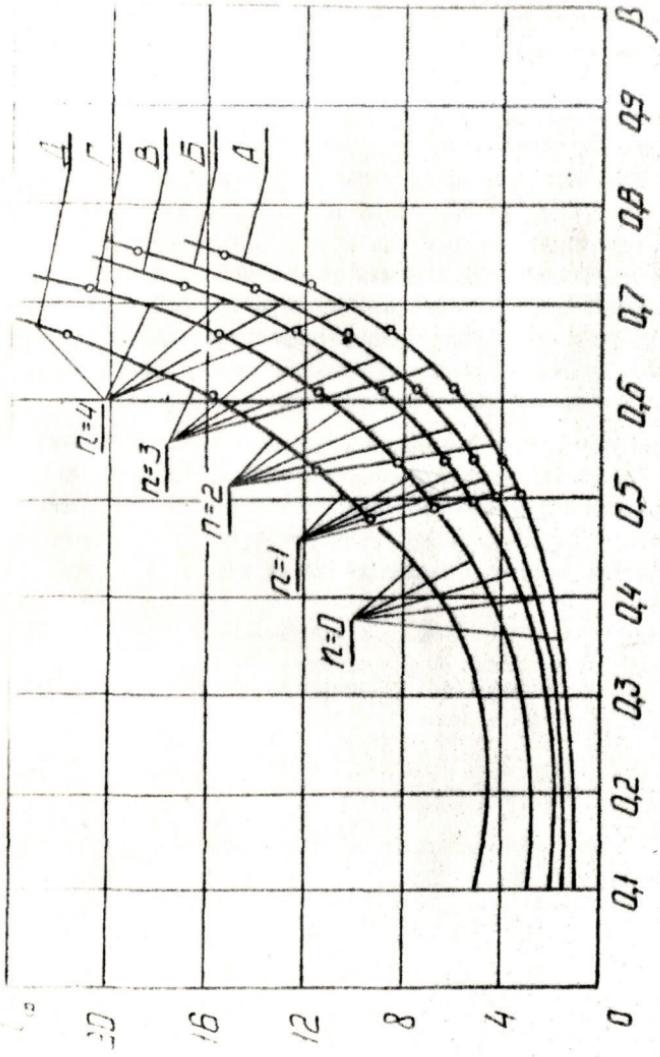


FIG. I

вых пластин, как установлено, не зависит от величины параметра  $\beta$  и соответствует образованию двух узловых диаметров.

Оценку величины критического перепада температуры, возникающего при выпучивании свободной кольцевой пластины, можно получить, применяя простой приближенный способ, основанный на использовании сходства распределения температурных напряжений в такой пластине и распределения напряжений при чистом изгибе круговой полосы. Поскольку решение задачи об устойчивости плоской формы изгиба круговой полосы известно, причем в литературе рассмотрены как случай упругого деформирования полосы, так и случай возникновения пластических деформаций в до-критическом состоянии (работы Л.М.Качанова), а также установлена форма потери устойчивости неравномерно нагретой кольцевой пластины, для нахождения критического перепада температуры достаточно установить связь между моментом тепловых напряжений и радиальным перепадом температур.

Взаимосвязь указанных величин определена на основании решения задачи о напряженном состоянии плоского кольцевого стержня малой кривизны при линейном распределении температуры вдоль радиуса.

Для случая упругих деформаций имеем

$$\Delta T = \frac{12 M}{\alpha E \delta (r_2 - r_1)^2} . \quad (14)$$

При упруго-пластическом деформировании пластины из идеально пластического материала

$$\Delta T = \frac{2 \sigma_s}{\alpha E} \frac{1}{\sqrt{3 - 12 \frac{M}{\sigma_s (r_2 - r_1)^2 \delta}}} . \quad (15)$$

Определяя величину критического перепада температуры (критическое значение момента), необходимо учесть, что форма потери устойчивости пластины соответствует форме выпучивания шарнирно опертой круговой полосы с центральным углом, равным  $\pi/2$ .

Результаты, полученные при использовании предложенного приближенного способа, имеют достаточную точность, если рас-

пределение температуры в пластине не слишком значительно отличается от линейного, а отверстие в ней достаточно велико.

Наряду с теоретическим изучением влияния осесимметричного нагрева на устойчивость плоской формы равновесия кольце-вых пластин было выполнено экспериментальное исследование, посвященное этому же вопросу. При проведении экспериментального исследования преследовались две основные цели:

1) проверить возможность появления неосесимметричных форм потери устойчивости кольцевых пластин, найденных в результате теоретического анализа;

2) сопоставить величину критического перепада температуры в случае возникновения неосесимметричной формы потери устойчивости с оценкой, полученной на основании выполненных расчетов. Кроме того, было проверено предположение о совпадении форм потери устойчивости неравномерно нагретых кольцевых пластин при упругом и неупругом деформировании их в докритическом состоянии.

Экспериментальное исследование проводилось на специальной установке при использовании высокочастотного способа нагрева, позволяющего создавать значительные радиальные перепады температуры в пластинах. Испытания проводились с применением пластин двух типов:

- 1) с массивным центром и тонкой периферийной частью;
- 2) со свободным наружным и внутренним краем.

Пластины были изготовлены из стали Ст.5.

При нагреве всех испытанных образцов наблюдалось интенсивное коробление с образованием волн в окружном направлении. Форма выпучивания пластин оценивалась визуально и фотографировалась.

Наблюдавшиеся формы выпучивания сопоставлялись с формами потери устойчивости, найденными в результате теоретического анализа случая линейного распределения температуры в пластинах.

Экспериментальное определение величины критического перепада температуры производилось для пластин второго типа на основании осциллографирования процесса выпучивания пластин в условиях осесимметричного нестационарного нагрева при возрастании радиального перепада температуры. Эксперименты проводились с

пластинами двух видов: с малой и большой изгибной жесткостью.

На рис. 2 показан график изменения прогиба одной из точек пластины ( $t_1 = 144$  мм,  $t_2 = 184$  мм,  $\delta = 2,4$  мм, материал — сталь 45) в зависимости от перепада температуры между ее краями. Вертикальная линия на графике соответствует расчетной величине критического перепада температуры ( $\Delta T_c = 84^\circ\text{C}$ ), найденной с помощью приближенного способа оценки устойчивости свободных кольцевых пластин.

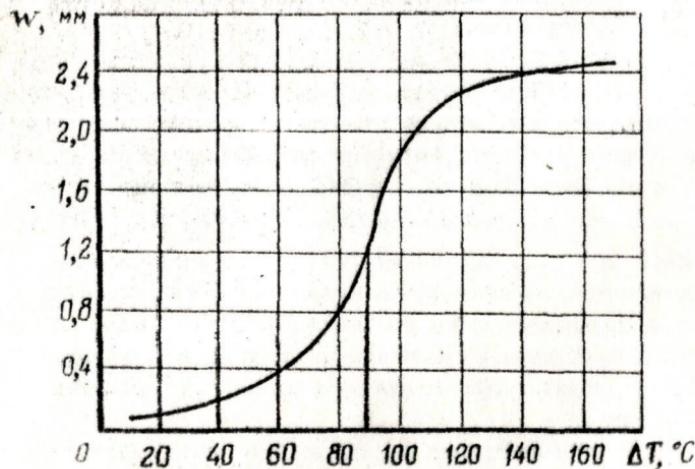


Рис. 2

Из рассмотрения графика следует, что теоретические значение критического перепада температуры находится в интервале значений  $\Delta T'$ , характеризующемся интенсивным нарастанием прогиба.

Вопрос об устойчивости первоначальной формы равновесия тонкостенных конструктивных элементов является частью более общего вопроса — о развитии выпучивания при тепловых воздействиях.

Известно, что при однократном действии одной только тепловой нагрузки прогибы тонкостенного элемента, которые возникают при выпучивании, имеют вполне определенную величину, за-

сящую от того, насколько превышена критическая температура нагрева. Менее известен тот факт, что при многократном действии тепловой нагрузки без влияния внешних механических воздействий выпучивание конструктивного элемента может нарастать с увеличением числа циклов изменения температуры.

По-видимому, первое указание на то, что в условиях теплосмен наблюдается прогрессирующее выпучивание тонкостенных частей конструкций, содержится в совместной работе Д.А.Гохфельда и К.И.Кононова, в которой рассмотрены результаты натурных термоциклических испытаний рабочего колеса центро斯特ремительной турбины турбокомпрессора тракторного двигателя в условиях многократных пусков двигателя. В ходе таких испытаний, в частности, было обнаружено, что с увеличением числа запусков двигателя образуется заметное остаточное коробление кромки диска турбоколеса. Было высказано предположение, что задевание турбоколеса за корпус, которое имело место при эксплуатационных испытаниях турбокомпрессора, может быть связано с этим эффектом. Лабораторные сравнительные термоциклические испытания турбоколес различной конструкционной формы, в которых принимал участие диссертант, также показали, что в условиях действия повторной тепловой нагрузки наблюдается прогрессирующее выпучивание аналогичного вида.

Прогрессирующее формоизменение, связанное с выпучиванием, представляющее в одних случаях значительную опасность для конструкции, в других случаях может найти применение как некоторый технологический прием. Эксперименты, описанные Д.А.Гохфельдом и А.Г.Лаптевским, которые проводились с тонкостенными образцами, подвергнутыми воздействиям подвижного "точечного" (локального) источника тепла, показали, что в таких условиях на поверхности образца возникают гофры. Этот процесс предложен в качестве метода гофрирования труб.

Причины необратимого формоизменения деформируемых систем при теплосменах в отсутствии внешней механической нагрузки и выпучивания ее элементов достаточно исследованы в работах Д.А. Гохфельда; представляется возможным использовать развитие в

них представления и подходы при изучении механизмов прогрессирующего коробления упруго-пластических систем в условиях повторных тепловых воздействий.

Анализируя результаты экспериментальных исследований, можно выявить ряд факторов, способных оказать влияние на величину и характер накопления деформаций. Наиболее важными из них являются:

- 1) геометрическая нелинейность процесса деформирования при выпучивании;
- 2) характер теплового воздействия на упруго-пластическую систему в различные периоды температурного цикла;
- 3) зависимость свойств применяемых материалов от температуры;
- 4) микронеоднородность конструкционных материалов и временные свойства их;
- 5) нестабильность диаграммы деформирования материала.

В диссертации основное внимание уделено рассмотрению влияния первых трех из всех перечисленных факторов. В качестве объектов исследования выбраны различные статически неопределенные стержневые модели, свойства материала элементов которых приняты наиболее простыми, соответствующими свойствам идеально упругого и жестко-пластического тел. Результаты исследований изложены в третьей главе диссертации.

Роль геометрической нелинейности процесса деформирования упруго-пластической системы при выпучивании показана на примере модели шарнирно-спирального стержня. Модель состоит из трех участков прямоугольного сечения, причем симметрично расположенные крайние участки испытывают только упругую деформацию а средний элемент модели, имеющий пренебрежимо малую длину, является жестко-пластическим. Температура модели циклически меняется в установленных пределах. Свойства материала элементов модели не зависят от температуры.

Кинетику деформирования модели удобно наблюдать на диаграмме, отражающей зависимость момента, действующего в жестко-пластическом элементе от величины продольного усилия (рис. 3).

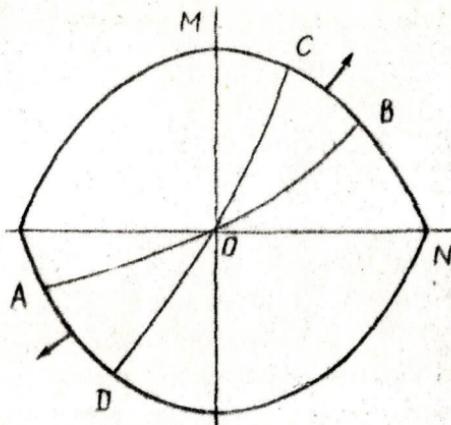


Рис. 3

Поскольку связь между указанными величинами нелинейная, упругая стадия деформирования модели изображается криволинейными участками: АВ (при нагреве) и СД (при охлаждении). Пластическая стадия деформирования модели отражена участками ВС (нагрев) и АД (охлаждение) на кривой, соответствующей предельному состоянию жестко-пластического элемента (поверхности нагружения).

Из рисунка видно, что соотношение между скоростями линейной и угловой деформаций элемента (которое определяется наклоном вектора, нормального к поверхности нагружения) будет отличаться в различные периоды температурного цикла. При нагреве деформирование элемента характеризуется в среднем большей скоростью угловой деформации, а при охлаждении — большей скоростью линейной деформации. Поэтому каждому циклу изменения температуры соответствует некоторое приращение пластического удлинения среднего элемента, а, следовательно, увеличение стрелы прогиба модели.

С помощью рассматриваемой модели исследовано влияние первоначальных несовершенств ее на рост остаточного прогиба, а также влияние степени нагрева на кинетику ее деформирования.

Показано, что существует температура приспособляемости модели, превышение которой вызывает прогрессирующее выпучивание модели.

В третьей главе диссертации приведен анализ влияния особенностей теплового воздействия на кинетику деформирования упруго-пластических систем при выпучивании. Рассмотрены: случай, характеризующийся подвижностью температурного поля, а также пример, иллюстрирующий влияние "обратных" перепадов температуры. Исследования выполнены с использованием различных стержневых моделей с сосредоточенной деформативностью.

Модель, с помощью которой изучалась кинетика выпучивания ее элементов при действии подвижного источника тепла, представляет два недеформируемых диска, связанных между собой несколькими стержнями. Каждый стержень состоит из двух симметрично расположенных жестких частей, которые шарнирно связаны с дисками, и упруго-пластического элемента, расположенного между ними. Свойства материала элементов модели, также как и в ранее рассмотренном примере, считались независящими от температуры.

Температурное воздействие на модель заключалось в последовательном нагреве и охлаждении ее стержней (температурное поле типа "тепловой волны").

В результате анализа кинетики деформирования конкретной модели вышеуказанного вида установлено, что при тепловых воздействиях рассматриваемого типа прогибы стержней модели значительно возрастают с увеличением числа проходов температурного поля (к концу третьего цикла, например, остаточные прогибы стержней модели примерно соответствуют максимальному прогибу первого стержня при первом нагреве его).

Рассмотренные выше механизмы нарастания прогибов упруго-пластических систем не связаны с влиянием температуры на физико-механические характеристики материала ее элементов. Учет такого влияния не изменит общий характер деформирования рассмотренных моделей, а отразится лишь на количественных оценках расчетных параметров.

В последнем из изученных в диссертации механизмов прогрессирующего коробления, связанном с влиянием "обратных" температурных перепадов, важную роль играет зависимость предела текучести материала от температуры.

Чтобы пояснить принцип функционирования этого механизма, рассмотрим условия деформирования защемленного стержня при теплосменах. Допустим, что при охлаждении нагретого стержня температура его вблизи мест закрепления в связи с наличием утолщений опорных деталей превышает температуру остальной части его. При этом, в связи с местным понижением предела текучести материала, возможно образование пластического удлинения в зонах с повышенной температурой. В период нагрева наиболее высокая температура возникает в средней части стержня, удаленной от опор, где имеются условия для отвода тепла. По этой причине снижается сопротивление изгибу и может появиться выпучивание стержня.

Расчеты, выполненные с использованием стержневой модели, показали, что в рассматриваемых температурных условиях возможно значительное накопление деформаций, связанных с выпучиванием.

В последнем параграфе третьей главы приведена методика и результаты лабораторных сравнительных термоциклических испытаний различных конструктивных вариантов рабочей турбины турбокомпрессора ТКР-II, устанавливаемого для наддува на двигатели тяжелых гусеничных тракторов, выпускаемых Челябинским тракторным заводом.

Выше уже отмечалось, что при эксплуатационных испытаниях турбокомпрессора наблюдались случаи разрушения турбинных дисков. Среди причин, способствующих разрушению дисков, отметим термоусталость материала дисков, возникающую в условиях повторных тепловых воздействий, а также прогрессирующее коробление кромки турбоколеса. В работах ряда авторов были предложены различные рекомендации с целью повышения термостойкости диска и устранения термического коробления его.

Для проверки эффективности этих рекомендаций были прове-

дены лабораторные термоциклические испытания турбоколес, имеющих различную конструктивную форму. Испытывались четыре варианта дисков:

- 1) вариант А - соответствовал диску рабочего колеса турбокомпрессора согласно заводским чертежам (диск имел малую толщину кромки);
- 2) вариант В - рабочее колесо с увеличенной толщиной кромки диска;
- 3) вариант В - рабочее колесо турбины с балансировочным буртом на периферии;
- 4) вариант Г - турбоколесо, у которого между лопатками удален материал.

Испытания проводились на специальной установке, включавшей нагревательное устройство (электропечь специальной конструкции) и достаточно мощный вентилятор. Перед рабочими испытаниями, с целью выбора режима нагрева и охлаждения турбоколес и для сопоставления результатов ранее выполненных стендовых испытаний серийной модификации турбоколеса с данными лабораторных исследований, было проведено термометрирование колеса рабочей турбины, изготовленного в соответствии с первым вариантом. В ходе проведенного термометрирования было установлено, что при нагреве и охлаждении турбоколеса на лабораторной установке возникают радиальные перепады температур, близкие к создававшимся в условиях стендовых испытаний.

Результаты проведенных испытаний отражены в выводах по всей работе.

#### Выводы

I. Анализ и сопоставление различных методов исследования устойчивости неравномерно нагретых упругих кольцевых пластин показали, что для практического использования в инженерных расчетах (в том случае, когда рассматриваются неосесимметричные формы выпучивания) наиболее приспособлены метод Ритца и метод конечных разностей. Применение методов, основанных на построении решений дифференциального уравнения устойчивости кольцевых

и круглых пластин в виде обычных и обобщенных степенных рядов (метод последовательных приближений, метод Фробениуса), связано с выполнением более сложной вычислительной работы, автоматизация которой затруднена.

2. На основе использования энергетического подхода, реализация которого осуществлена с помощью метода Ритца, разработан алгоритм и составлена программа расчетов на ЭВМ "Урал-2", позволяющая анализировать устойчивость упругих кольцевых пластин с учетом возможности возникновения неосесимметричных форм выпучивания.

3. Получено решение ряда конкретных задач, в которых исследована устойчивость кольцевых пластин с одним или двумя свободными краями, при следующих сочетаниях граничных и температурных условий:

а) пластина защемлена на наружном крае и свободна на внутреннем, распределение температуры вдоль радиуса соответствует степенному закону;

б) пластина защемлена на внутреннем крае и свободна на наружном, принят степенной закон изменения температуры в радиальном направлении;

в) пластина свободна на обоих краях, распределение температуры вдоль радиуса соответствует линейному закону.

Результаты решения указанных задач могут быть использованы в тех случаях, когда необходимо оценить вероятность возникновения термического выпучивания из-за наличия радиального перепада температуры (закалочное коробление дисковых фрез, выпучивание дисков сцепления бортовых фрикционов гусеничных машин и т.д.).

4. Установлено, что оценка устойчивости осесимметрично нагретых кольцевых пластин, края (или один край) которых свободны от кинематических связей, должна производиться с учетом возможности возникновения неосесимметричных форм выпучивания. Использование распространенного предположения об осесимметричном характере выпучивания при исследовании устойчивости таких пластин может привести к ошибочным результатам.

5. Выявлено, что форма потери устойчивости пластины в окружном направлении (количество узловых диаметров) не зависит от закона распределения температуры вдоль радиуса. На величину критического перепада температуры закон изменения ее по радиусу оказывает заметное влияние.

6. Предложен приближенный способ определения критического перепада температуры для кольцевых пластин, имеющих свободные края, пригодный для оценки устойчивости плоской формы упруго-пластического равновесия таких пластин.

7. Создана установка для экспериментального изучения коробления кольцевых пластин при осесимметричном нагреве. Примененный в ней индукционный способ нагрева в высокочастотном электромагнитном поле, которое создается с помощью достаточно мощного генератора переменного тока, позволяет получить значительные радиальные перепады температуры. Использованный способ нагрева дает возможность непосредственно наблюдать форму выпучивания пластин и производить замеры перемещений ее поверхности, применения несложное измерительное приспособление.

8. В результате экспериментального исследования коробления кольцевых пластин подтверждено, что выпучивание пластин, имеющих один или два свободных края, происходит с образованием неосесимметричных равновесных форм. Найденные из эксперимента формы термического коробления кольцевых пластин, имеющих жесткий центр, а также форма выпучивания кольцевых пластин со свободными краями находятся в удовлетворительном соответствии с теоретическими формами потери устойчивости таких пластин. Результаты экспериментального определения критических перепадов температуры для свободных кольцевых пластин достаточно хорошо согласуются с теоретическими результатами, полученными с помощью метода Ритца и с использованием предложенного приближенного способа оценки устойчивости таких пластин.

9. С помощью стержневых моделей проведено изучение влияния различных факторов на развитие выпучивания деформируемых систем, не подвергенных действию внешней механической нагрузки, но испытывающих повторные тепловые воздействия. В выполненном исследовании основное внимание удалено роли геометрической не-

линейности процесса деформирования при выпучивании и особенностей теплового воздействия на систему (действие подвижного источника тепла, возникновение "обратного" перепада температуры при охлаждении). В результате рассмотрения кинетики циклического деформирования моделей при теплосменах выявлен ряд механизмов прогрессирующего выпучивания; таким образом показано, что повторное действие тепловой нагрузки может являться причиной нарастания необратимого выпучивания упруго-пластической системы. Возможность развития формоизменения такого вида необходимо иметь в виду в том случае, когда работа тонкостенного элемента конструкции происходит в изменяющихся температурных условиях.

10. Для сравнения термостойкости и склонности к термическому короблению различных конструктивных вариантов дисков рабочей турбины турбокомпрессора ТКВ-II были выполнены лабораторные термоциклические испытания турбоколес, имеющих отличающуюся форму. Указанные испытания проводились в связи с наблюдавшимся в эксплуатации аварийным короблением дисков турбины и образованием термоусталостных трещин в нем. В результате испытаний установлено, что увеличение толщины диска, введение балансировочного бурта и удаление материала в межлопаточном промежутке способствовало повышению термостойкости диска и полностью устранило его коробление.

11. Обнаруженное при испытаниях прогрессирующее коробление диска с малой толщиной на периферии, аналогичное наблюдаемому в эксплуатационных условиях, качественно соответствует особенностям поведения некоторых из рассмотренных моделей.

12. Проведенные испытания показали, что коробление кромки диска ускоряет его термоусталостное разрушение; обнаружено также, что термовыпучивание диска с тонкой кромкой было более интенсивным в тех местах, где толщина его была меньше名义ной. В связи с этим следует считать недопустимой балансировку ротора турбины путем удаления значительных слоев металла с торца диска на его внешнем крае.

Материалы диссертации докладывались на УГ и IX научных совещаниях по тепловым напряжениям в элементах конструкций (г. Киев 1965, 1968 гг); на ХУШ - XXIII научно-технических конференциях Челябинского политехнического института (1965 -1970 годы). Основные результаты диссертации изложены в следующих статьях.

1. Гехфельд Д.А., Харитончик А.Е. О прогрессирующем выпучивании в условиях теплосмен. В сб. "Тепловые напряжения в элементах конструкций", вып. 6. Киев, "Наукова думка", 1966.
2. Кюннов К.М., Харитончик А.Е. Термическая усталость дисков радиальной газовой турбины. В сб. научных трудов Челябинского политехнического ин-та, № 45. Челябинск, 1968.
3. Харитончик А.Е. Потеря устойчивости кольцевой пластинки при воздействии осесимметричного температурного поля. Тезисы докладов IX научного совещания по тепловым напряжениям в элементах конструкций. Киев. "Наукова думка", 1968.
4. Харитончик А.Е. К исследованию неосесимметричных форм потери устойчивости кольцевых пластин при осесимметричном нагреве. ИВУЗ - "Машиностроение", 1969, № 5.
5. Харитончик А.Е. Устойчивость кольцевых пластин за пределом упругости при неравномерном нагреве. Материалы XXIII научно-технической конференции ЧПИ им. Ленинского комсомола, Челябинск, 1970.

Техн. редактор Л.С. Заварухина

---

ФБ 06098, 30/1-73 г. Сдано в печать 31/1-73 г. Формат бумаги 60x90 1/16. Объем 1,5 п.л. Отпечатано на ротапринте ЧПИ. Тираж 120 экз. Заказ № 48/127.