

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ

На правах рукописи

НОВИКОВ СЕРГЕЙ ВАЛЕРИЕВИЧ

СВЯЗАННАЯ ЗАДАЧА ТЕРМОПЛАСТИЧНОСТИ  
ТОНКИХ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ  
ПРИ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

01.02.04 - механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕЗЮМЕ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Киев -- 1993

Диссертацией является рукопись.

Работа выполнена в Институте механики АН Украины.

Научный руководитель - член-корреспондент АН Украины  
**ШЕВЧЕНКО Ю.Н.**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор

**КАРНАУХОВ В.Г.**

кандидат физико-математических наук  
**КУЧЕР Н.К.**

Ведущая организация - Киевский политехнический институт.

Защита состоится "30" ноября 1993 года в 10 часов  
на заседании специализированного совета К 016.49.01 Института  
механики АН Украины (252057, г.Киев, ул.П.Нестерова,3).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке  
Института механики АН Украины.

Автореферат разослан "21" октября 1993 года.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00810726 (0)

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
доктор технических наук

*Гриз*

**В.М. НАЗАРЕНКО**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа посвящена решению связанной осесимметричной задачи циклической термопластичности оболочек вращения с произвольной формой меридиана и исследованию соответствующих физико-механических эффектов. Учитывается циклическая нестабильность материала оболочки и зависимость его механических свойств от температуры. Предполагается, что накопление деформаций ползучести и усталостных повреждений в рассматриваемых процессах нагружения можно не учитывать. Применяются соотношения теории малых упругопластических деформаций при переменных нагружениях и используется численное интегрирование разрешающих систем дифференциальных уравнений термопластичности и теплопроводности методом Рунге-Кутты с дискретной ортогонализацией и нормализацией С.К.Годунова.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Многие элементы конструкций работают под действием циклически изменяющихся нагрузок, вызывающих упругопластическое деформирование. В результате диссипации механической энергии происходит разогрев таких элементов, причем температура разогрева при большом числе циклов нагружения может достигать больших значений. Вследствие этого в элементах конструкций возникают тепловые деформации, могут существенно изменяться свойства материала и, как следствие, характер деформирования. Учет связанности полей деформаций и температуры позволяет глубже, полнее и количественно точнее описать поведение таких элементов конструкций, выявить при этом новые эффекты и оценить границы применимости решений, полученных в несвязанной постановке. Поэтому разработка методов решения связанных задач циклической термопластичности является актуальной задачей механики деформируемого твердого тела.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ заключается в разработке методики решения связанной осесимметричной задачи циклической термопластичности оболочек вращения с произвольной формой меридиана и исследовании на ее основе соответствующих физико-механических эффектов.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА заключается в разработке методики и решении новых задач термомеханики по определению связанного осесимметричного циклического термоупругопластического деформирования оболочек вращения с произвольной формой меридиана, находящихся в условиях комбинированного теплообмена с окружающей средой.

ДОСТОВЕРНОСТЬ полученных результатов определяется рамками применимости гипотез Кирхгофа-Лява и соотношений теории малых упругопластических деформаций при переменных нагружениях, конкретизированных на основе модифицированной записи обобщенного принципа Мазинга. Точность результатов проверяется путем сгущения пространственной сетки и уменьшения этапов нагрева. Адекватность уравнений состояния исследуемым процессам нагружения проверяется путем исследования геометрии построенных траекторий деформирования.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ работы заключается в том, что разработанная методика и составленный на ее основе пакет программ для ЭВМ могут быть использованы при оценке связанного термомеханического поведения оболочечных конструкций, работающих в условиях циклического упругопластического нагружения и теплообмена с окружающей средой. Работа выполнялась согласно теме научно-исследовательских работ Института механики АН Украины I.3.I.192п "Исследование закономерностей упруговязкопластического деформирования материалов и элементов конструкций при переменных неизотермических процессах нагружения".

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Основные положения диссертационной работы доложены на XII - XV-й научных конференциях молодых ученых Института механики АН Украины (Київ, 1987 - 1990 г.г.), XVI-й научно-технической конференции молодых ученых и специалистов Института проблем машиностроения АН Украины (Харьков, 1988 г.), конференции "Ползучесть материалов и элементов конструкций в энергомашиностроении" (Київ, 1989 г.), Сибирской школе по современным проблемам механики деформируемого твердого тела (Якутск, 1990 г.), 3-й Всесоюзной конференции по механике неоднородных структур (Львов, 1991 г.), Научном совещании "Термовязкоупруго-пластические процессы деформирования в элементах конструкций" (Канев, 1992 г.).

ПУБЛИКАЦИИ. По теме диссертации опубликовано 10 работ [1-10].

ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ. Диссертационная работа состоит из трех глав, заключения и списка основной использованной литературы, включающего 51 наименование. Объем работы 157 страниц машинописного текста, включая 39 рисунков и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность рассматриваемой задачи и дан обзор литературы по экспериментальным и теоретическим исследованиям термомеханической связанности в циклически упруго-пластически деформируемых телах.

Экспериментальные исследования по рассматриваемой проблеме отражены в работах М.М.Гаденина, Д.В.Гриневича, В.О.Маханева, Н.А.Махутова, А.Н.Романова, S.L.Adams, M.G.Beghi, C.E.Bottani, G.Caglioti, O.W.Dillon, Jr., N.F.Enke, A.Pazzi, H.Harig, E.Krempf, K.Müller, B.I.Sandor. Результаты теоретических исследований - в работах Я.А.Жука, В.В.Москвитина, И.К.Сенченкова, С.С.Соколова, П.Б.Федорова, D.H.Allen, E.P.Cernocky, O.W.Dillon, Jr., W.E.Haisler, J.Kratochvil, E.Krempf, J.W.Osborne.

Анализ работ упомянутых авторов показал, что результаты проведенных к настоящему времени экспериментальных исследований свидетельствуют о существенности диссипативного разогрева при циклическом упругопластическом деформировании материалов. Изложенные к настоящему времени теоретические исследования касаются, в основном, рассмотрения процессов одноосного нагружения стержней. Определение двумерного температурного поля в пластине осуществлено для циклически стабильного материала, диаграмма деформирования которого обладает линейным упрочнением. Решение связанных задач циклического упругопластического деформирования в точной постановке, с учетом нестационарного термоупругого эффекта и диссипации в пределах цикла, требует выбора малого шага по времени, значительно меньшего длительности цикла нагружения. Эта практическая проблема решается путем применения тригонометрических рядов по времени, как это делается при решении связанных задач циклической вязкоупругости в работах В.Г.Карнаухова, И.К.Сенченкова, Н.К.Кучера и других авторов. Однако, в таком случае при решении задач квазистатического упругопластического деформирования возникают трудности; связанные с необходимостью построения большого числа функций комплексных модулей, зависящих от деформации, номера цикла, температуры; с определением напряженно-деформированного состояния в конкретные моменты времени в пределах цикла, например, остаточного. В литературе не нашли отражения вопросы, посвященные учету зависимости свойств матери-

ала от температуры, комплексному анализу термомеханического поведения материалов в зависимости от их циклических свойств, а также систематическим исследованиям по определению связанных полей квазистатического упругопластического деформирования и температуры в телах сложной формы.

В отличие от приведенных в обзоре работ данная диссертационная работа посвящена решению связанной осесимметричной задачи циклической термопластичности оболочек вращения с произвольной формой меридиана из материала, обладающего циклической неустойчивостью, с учетом зависимости его механических свойств от температуры.

В первой главе приводятся исходные соотношения теории тонких оболочек вращения и дается постановка задачи.

Рассмотрена односвязная замкнутая в окружном направлении изотропная оболочка вращения с переменной вдоль меридиана толщиной. Приложенные к оболочке механические нагрузки претерпевают многократное циклическое изменение без выдержек, которое не приводит к существенному отклонению траекторий деформирования от прямых. Предполагается, что накопление деформаций ползучести, усталостных повреждений, а также зависимость теплофизических характеристик от температуры в рассматриваемых процессах деформирования можно не учитывать. В процессе нагружения оболочка обменивается теплотой с окружающей средой. Теплообмен оболочки осуществляется через ее поверхность посредством конвекции, излучения или заданного по величине теплового потока произвольной физической природы. Материал оболочки является циклически неустойчивым.

Положение произвольной точки оболочки определено в естественной системе координат  $\alpha, \theta, \zeta$ , связанной со срединной поверхностью оболочки. Координата  $\alpha$  отсчитывается вдоль меридиана срединной поверхности оболочки,  $\theta$  - в окружном направлении, а  $\zeta$  ( $-H \leq \zeta \leq H$ ) - вдоль нормали к срединной поверхности,  $2H$  - толщина оболочки.

Полуцикл пропорционального деформирования элемента оболочки определен как отрезок времени монотонного деформирования, заключенный между моментами времени изменения направления или начала

деформирования. На основе предположений о малости изменения температуры в полуцикле и квазистатическом пропорциональном нагружении элементов оболочки сделан вывод о том, что во всех элементах оболочки полуцикла деформирования совпадают между собой и определяются изменением внешних воздействий во времени. Это позволяет записать линейные статические и геометрические уравнения для осесимметрично нагруженных оболочек вращения, полученные на основе гипотез Кирхгофа-Лява, относительно приращений величин в полуцикле; приращение величины в полуцикле определяется как разность ее значений в текущем полуцикле и в конце предыдущего полуцикла.

При записи соотношений пластичности (зависимостей усилий и моментов от деформаций срединной поверхности оболочки) использованы соотношения теории малых упругопластических деформаций при переменных нагружениях. В результате применения линеаризации по методу переменных параметров упругости и использования гипотез Кирхгофа-Лява, соотношения пластичности для некоторого  $n$ -го полуцикла записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned} \hat{N}_s &= C_{00} \hat{\epsilon}_s + C_{01} \hat{\epsilon}_\theta + C_{10} \hat{x}_s + C_{11} \hat{x}_\theta - P_0 \\ \hat{M}_s &= C_{10} \hat{\epsilon}_s + C_{11} \hat{\epsilon}_\theta + C_{20} \hat{x}_s + C_{21} \hat{x}_\theta - P_1 \end{aligned} \quad (s \rightarrow \theta), \quad (I)$$

где  $N_s$  - нормальное усилие,  $M_s$  - изгибающий момент, действующие в сечении оболочки  $s = \text{const}$ ,  $N_\theta$  и  $M_\theta$  аналогичные усилие и момент, действующие в сечении  $\theta = \text{const}$ ;  $\epsilon_s, \epsilon_\theta$  - компоненты деформации срединной поверхности оболочки вдоль координат  $s$  и  $\theta$ ;  $x_s, x_\theta$  - параметры изменения кривизны в тех же направлениях. Жесткостные характеристики  $C_{mk}$  ( $m=0,1,2; k=0,1$ ), дополнительные усилие  $P_0$  и момент  $P_1$ , вычисляются по формулам

$$C_{mk} = \int_{-H}^H \frac{2G^*(\nu^*)^k}{1-\nu^*} \zeta^m d\zeta, \quad P_k = \int_{-H}^H \frac{2G^*(1+\nu^*)\alpha_T \hat{T}}{1-\nu^*} \zeta^k d\zeta, \quad (2)$$

В соотношениях (I) и (2)

$$G^* = \frac{\hat{S}}{2\hat{T}} \quad \text{и} \quad \nu^* = \frac{G(1+\nu) - G^*(1-2\nu)}{2G(1+\nu) + G^*(1-2\nu)} \quad (3)$$

переменные параметры упругости, характеризующие напряженно-деформированное состояние в текущий момент времени в полупериоде относительно состояния в конце предыдущего полупериода;  $\hat{T}$ ,  $\alpha_T$ ,  $\hat{T}$ ,  $\hat{S}$ ,  $G$ ,  $\nu$  - соответственно приращение температуры, коэффициент линейного теплового расширения, интенсивности приращений деформаций сдвига и касательных напряжений, модуль сдвига и коэффициент Пуассона; крышкой обозначено приращение величины в текущем полупериоде; запись, содержащая последовательность разделенных знаком  $\overleftrightarrow{\leftarrow}$  символов, обозначает соотношения, которые получаются из выписанного выражения путем круговой перестановки в нем указанных символов.

Для конкретизации соотношений пластичности применен обобщенный принцип Мазинга. Дана его модифицированная запись, которая описывает едиными уравнениями неизотермические процессы нагружения с полупериодами упругого и упругопластического деформирования циклически нестабильных материалов. Наличие полупериодов упругого деформирования в процессе упругопластического деформирования может быть обусловлено циклической нестабильностью материала, зависимостью его свойств от температуры, а также нестационарностью внешних воздействий.

Модифицированная запись обобщенного принципа Мазинга имеет следующие особенности:

- при расчете процесса деформирования на первоначальной стадии упругого циклического деформирования, до полупериода с появлением пластической деформации включительно, вместо диаграммы циклического деформирования используется мгновенная термомеханическая поверхность первоначального деформирования;

- при расчете процесса деформирования в полупериоде с возможным реверсом накопленной пластической деформации, который следует за полупериодом упругого деформирования, циклическая диаграмма строится не от точки начала разгрузки, а от точки предела текучести предыдущего полупериода. В случае невозможности реверса пластической деформации расчет в пластической области осуществляется по

диаграмме деформирования последнего из предшествующих полуциклов с первоначальным появлением или реверсом пластической деформации;

- для учета зависимости механических свойств циклически нестабильного материала от температуры вместо диаграммы однократного деформирования при фиксированной температуре использована мгновенная термомеханическая поверхность. Кроме этого, для учета различного характера циклического поведения материалов при различных температурах введена зависимость от температуры в функцию масштабных коэффициентов;

- в предположении, что на изменение характеристик циклического поведения циклически нестабильных материалов оказывают влияние только те полуциклы, в которых происходит первоначальное появление или реверс пластической деформации, в качестве аргумента функции масштабных коэффициентов вместо номера полуцикла принят параметр, определяемый количеством полуциклов, в которых происходит первоначальное появление или реверс пластической деформации.

Используемая модель опирается на следующие экспериментальные данные: мгновенную термомеханическую поверхность растяжения материала, значения предела текучести при различных температурах и функцию масштабных коэффициентов. Изложен подход к их экспериментальной конкретизации. Для определения масштабных коэффициентов в полуциклах, а также степенной аппроксимации функции масштабных коэффициентов применен метод наименьших квадратов. Определение масштабного коэффициента для полуцикла при этом сведено к решению линеаризованного квадратного уравнения.

Для описания температурного поля использовано уравнение теплопроводности следующего вида:

$$\frac{1}{\alpha} \dot{T} = \Delta T + \frac{1}{\lambda} (R+W), \quad (4)$$

где  $\alpha$  - коэффициент температуропроводности,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала,  $\Delta$  - дифференциальный оператор Лапласа в координатах  $\alpha, \zeta$ ,

$$R = -3\alpha_T T \dot{\sigma}_0 - \quad (5)$$

член, характеризующий термоупругий тепловой эффект. Диссипатив-

ная функция  $W$  упругопластически деформируемого материала выражена формулой

$$W^{(n)} = s'_{ij} (n-1) \dot{\hat{e}}_{ij}^{(n)} - \frac{s'_{ij} (n-1) \dot{\hat{\sigma}}_{ij}^{(n)}}{2G^{(n)}} + 2\hat{S}^{(n)} \left[ \dot{\hat{\Gamma}}^{(n)} - \frac{\dot{\hat{S}}^{(n)}}{2G^{(n)}} \right], \quad (6)$$

где  $\hat{e}_{ij}$ ,  $\hat{\sigma}_{ij}$  - приращения компонент девиаторов деформаций и напряжений, верхний индекс в скобках обозначает принадлежность соответствующей величины тому или иному полуциклу, штрихом обозначены значения в конце полуцикла. В формуле (6) в одночленах, содержащих повторяющиеся индексы, предполагается суммирование на множестве значений этих индексов  $(s, \theta, \zeta)$ , причем  $s_{ij} = e_{ij} = 0$  при  $i \neq j$ .

Представлены механические и тепловые граничные условия, а также начальное условие для температуры. Механические граничные условия сформулированы: а) в усилиях и моментах  $\hat{N}_s, \hat{Q}_s, \hat{M}_s, \sigma$  в перемещениях и углом поворота  $\hat{u}, \hat{w}, \hat{\theta}_s$ , в) при помощи линейных комбинаций указанных величин. Тепловые граничные условия, записаны в виде

$$\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_{(p)} = -\alpha_{(p)} (T_{(p)} - \theta_{(p)}) - \mu_{(p)} B (T_{(p)}^4 - \theta_{(p)}^4) - q_{(p)} \quad (7)$$

$(p=1, \dots, 4)$ .

где  $n$ - внешняя нормаль к поверхности оболочки,  $\alpha$ - коэффициент конвективного теплообмена,  $\mu$ - приведенный коэффициент черноты,  $\theta$ - температура окружающей среды,  $B$ - постоянная Стефана-Больцмана,  $q$ - плотность заданного теплового потока, нижний индекс в скобках обозначает принадлежность соответствующей величины той или иной поверхности оболочки ( $p=1$  - на левом,  $p=2$  - на правом торцах оболочки;  $p=3$  на внутренней,  $p=4$  на наружной боковых поверхностях).

Приведенные в первой главе геометрические, статические, физические соотношения и уравнение теплопроводности совместно с граничными и начальными условиями образуют замкнутую систему уравнений для решения связанной задачи термопластичности тонких оболочек вращения при пропорциональном циклическом нагружении.

Во второй главе приводится решение связанной задачи термопластичности оболочек вращения при пропорциональном циклическом

нагружении на основе применения шагового метода. В соответствии с ним система уравнений связанной термопластичности, полученная в первой главе, разделена на систему уравнений несвязанной термопластичности и уравнение теплопроводности. При этом температура в системе уравнений термопластичности, а также компоненты напряженно-деформированного состояния в диссипативной функции уравнения теплопроводности приняты в качестве параметров. Построены разрешающие системы уравнений термопластичности и теплопроводности, а также алгоритм их совместного решения.

В соответствии с применяемым в работе для линеаризации физических соотношений методом переменных параметров упругости решение несвязанной задачи термопластичности в каждом приближении рассматриваемого этапа нагружения сводится к решению линеаризованной системы дифференциальных уравнений 6-го порядка в виде

$$\frac{dY^{t+1}}{ds} = P(s) Y^{t+1} + f(s) \quad (8)$$

при заданных на торцах оболочки граничных условиях в форме

$$DY^{t+1} = d, \quad (9)$$

где  $P(s)$  и  $f(s)$  - матрица и вектор свободных членов системы уравнений,  $D$  и  $d$  - матрица и вектор свободных членов граничных условий, верхние индексы обозначают номера приближений. Компонентами вектора  $Y$  являются следующие величины

$$Y = (\hat{N}_r, \hat{N}_z, \hat{M}_s, \hat{u}_r, \hat{u}_z, \hat{\theta}_s)^T, \quad (10)$$

в которых формулируются граничные условия. Здесь  $\hat{N}_r$  и  $\hat{N}_z$  - приращения радиального и осевого усилий, действующих в сечении  $s = \text{const}$ ;  $\hat{u}_r$  и  $\hat{u}_z$  - приращения радиальной и осевой компонент вектора перемещений точки срединной поверхности.

К уравнению теплопроводности (4) применена процедура усреднения за цикл нагружения. Учтена малость усредненного значения члена, характеризующего термоупругий тепловой эффект. Усредненная диссипативная функция выражена через значения характеристик напряженно-деформированного состояния только в фиксированные моменты времени, соответствующие концу полуциклов. Интегрированные функции, определяющей циклическую диаграмму, которая зависит от номера полуцикла, сведено к вычислению интеграла от функции,

определяющей диаграмму первоначального деформирования материала. Полученные для определения усредненной диссипативной функции выражения пригодны в случае незамкнутости петли пластического гистерезиса. Уравнение теплопроводности в предположении квадратичного распределения температуры по толщине оболочки с применением неявной разностной схемы по времени преобразовано к линеаризованной системе обыкновенных дифференциальных уравнений 6-го порядка вида (8) с соответствующими выражениями для коэффициентов матрицы  $P(z)$  и вектора  $f(z)$  при заданных на торцах оболочки граничных условиях вида (9). Компонентами вектора  $Y$  в данном случае являются следующие величины:

$$Y = (\bar{\eta}_0, \bar{\eta}_1, \bar{\eta}_2, \bar{\theta}_0, \bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2)^T, \quad (II)$$

где

$$\bar{\theta}_m = \frac{H}{-H} \int_{-H}^H T \zeta^m d\zeta, \quad \bar{\eta}_m = \frac{d\bar{\theta}}{dz}^m \quad (m=0, 1, 2), \quad (I2)$$

чертой сверху обозначена усредненная за цикл величина. Для разрешающих функций (II) сформулированы начальные условия.

Для оболочек с полюсами получены соответствующие системы разрешающих уравнений термопластичности и теплопроводности в полюсе.

На основе приведенных во второй главе разрешающих уравнений разработан алгоритм расчета, который заключается в поочередном решении систем уравнений термопластичности и теплопроводности методом ортогональной прогонки с уточнением температурного поля и напряженно-деформированного состояния. При этом система уравнений термопластичности решается на этапах, совпадающих с полуциклами нагружения. Величина этапа решения системы уравнений теплопроводности может превышать длительность цикла нагружения.

В этой же главе помещены результаты решения трех тестовых примеров.

В первом примере при рассмотрении циклического изотермического деформирования бесконечной цилиндрической оболочки с промежуточными разгрузками проведена апробация модифицированной записи обобщенного принципа Мазинга и формул вычисления усредненной диссипативной функции.

Во втором примере для проверки работоспособности блоков вычислительной программы, осуществляющих решение краевой задачи циклической пластичности, проведен расчет двух полуциклов нагружения шарнирно опертой круглой пластинки распределенной поперечной нагрузкой. Сопоставление результатов расчета с решением по методике В.А.Мерзлякова, использующей соотношения теории термопластичности при деформировании элемента тела по траекториям малой кривизны, показало хорошее их согласование.

В третьем примере для проверки работоспособности вычислительной программы при определении полей диссипативного разогрева, а также при учете граничных условий излучения тепла рассмотрено термомеханически связанное поведение цилиндрической оболочки конечной длины, находящейся в условиях осевого деформирования, излучения тепла в окружающую среду и притока тепла заданной величины. Результаты расчета сопоставлены с результатами, приведенными в работе D.H.Allen, W.E.Haisler. Показано хорошее их согласование.

В третьей главе помещены результаты решения трех новых задач.

В первой задаче исследовано однородное термомеханическое поведение бесконечной цилиндрической оболочки, подверженной осевому упругопластическому деформированию, в зависимости от циклических свойств материала. Расчеты проведены для трех модельных материалов: циклически стабильного, упрочняющегося и разупрочняющегося. Различие в циклическом поведении этих материалов моделируется при помощи различных значений параметра степенной аппроксимации функции масштабных коэффициентов. Рассмотрены процессы осевого гармонического силового и кинематического воздействия с постоянной амплитудой и частотой Гц. Амплитуды прикладываемого силового и кинематического воздействий таковы, что максимальные величины продольной деформации и напряжения в первом полуцикле кинематического нагружения равны соответствующим величинам при силовом нагружении. Тепловой поток вдоль оси оболочки отсутствует. На внутренней и наружной боковых поверхностях осуществляется либо конвективный теплообмен, характеризуемый значениями  $\bar{\alpha}_{(p)} = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ ,  $\bar{\mu}_{(p)} = \bar{q}_{(p)} = 0$ , либо излучение в безвоздушную среду при  $\bar{\mu}_{(p)} = 0,255$ ,  $\bar{\alpha}_{(p)} = \bar{q}_{(p)} = 0$  ( $p=3,4$ ). Температура

окружающей среды совпадает с начальной температурой оболочки

$$\bar{\theta}_{(p)} = T_0 = 293\text{K} \quad (p=1, \dots, 4).$$

В расчетах установлена пренебрежимость градиента температуры по толщине, поэтому значение нормальной координаты (как и меридиональной) при описании результатов не конкретизируется.

В результате решения задачи показано, что при кинематическом нагружении в условиях конвективного теплообмена наибольшее влияние на напряженное состояние оболочки из циклически стабильного материала оказывают тепловая деформация и тепловое разупрочнение материала, из циклически упрочняющегося и разупрочняющегося материалов – циклические свойства материала. Различие в изменении температуры во времени для всех трех материалов невелико. Поскольку температура разогрева в рассмотренных случаях не превышала 381К, то материал деформировался в области слабой чувствительности свойств к изменению температуры.

В условиях излучения тепла в безвоздушное пространство при кинематическом нагружении разогрев значительно больший. Материал выходит в процессе деформирования в область сильной чувствительности механических свойств к изменению температуры. В таких условиях для всех материалов наибольшее влияние на экстремальные значения напряжения оказывают тепловая деформация и тепловое разупрочнение. Как и в случае конвективного теплообмена различие в изменении температуры во времени для всех трех материалов незначительно.

Во всех рассмотренных случаях кинематического нагружения температура стабилизируется или близка к стабилизации. Этот вывод согласуется с результатом экспериментального исследования Н.А.Махутова, Ю.В.Гриневича и В.О.Маханева.

Качественная картина поведения деформации и температуры при силовом нагружении для обоих рассматриваемых случаев теплообмена идентична. Существенным отличием случая силового нагружения от случая кинематического нагружения при данных значениях параметров является неуставливающийся рост температуры разогрева и экстремальных значений осевой деформации для циклически стабильного и разупрочняющегося материалов, а также крайне незначительный уровень разогрева для циклически упрочняющегося материала. Количественное различие между случаями конвекции и излучения

проявляется в более интенсивном протекании в последнем случае неустановившихся процессов деформирования и разогрева для циклически стабильного и разупрочняющегося материалов.

Таким образом, характер разогрева оболочки в рассматриваемых условиях существенно зависит от способа нагружения: в режиме заданной деформации или напряжения. В разупрочняющемся материале при силовом нагружении из всех рассмотренных случаев разогрев самый интенсивный, в упрочняющемся - незначительный.

Во второй задаче проведен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния и разогрева цилиндрической оболочки с линейнопеременной вдоль меридиана толщиной при учете и в пренебрежении зависимости механических свойств материала от температуры. Оболочка изготовлена из хромоникелевой стали IX18Н9Т. В

рассматриваемом диапазоне температур ( $T \leq 543\text{K}$ ) эта сталь ведет себя как циклически стабильный материал. На оболочку на левом торце воздействует гармоническое во времени  $t$  осевое усилие  $N_{z(1)} = -\hat{N}'_z / 2 \cdot \sin 2\pi f t$  с размахом  $\hat{N}'_z = 2,1 \cdot 10^6 \text{H/м}$  и частотой  $f = 5 \text{Гц}$ , а  $\hat{N}_{r(1)} = \hat{\sigma}_{\sigma(1)} = 0$ . Остальные механические граничные условия заданы в виде: на левом торце  $\hat{N}_{r(1)} = \hat{\sigma}_{\sigma(1)} = 0$ , на правом -  $\hat{N}_{r(2)} = \hat{u}_{z(2)} = \hat{\sigma}_{\sigma(2)} = 0$ . Торцы оболочки, а также внутренняя боковая поверхность теплоизолированы. Через наружную боковую поверхность оболочки осуществляется конвективный теплообмен с коэффициентом теплоотдачи  $\bar{\alpha}_{(4)} = 100 \text{Вт/(м}^2\text{К)}$ . При этом  $\bar{\mu}_{(4)} = \bar{q}_{(4)} = 0$ . Температура окружающей среды совпадает с начальной температурой оболочки

$$\bar{\theta}_{(p)} = T_0 = 293\text{K} \quad (p=1, \dots, 4).$$

В результате решения задачи показано, что при учете зависимости свойств материала от температуры тепловыделение в оболочке не компенсируется теплоотдачей в окружающую среду и наиболее деформированная область оболочки интенсивно разогревается (рис.1, кривая 1). В пренебрежении зависимости свойств материала от температуры она повышается до достижения некоторого стабилизированного значения (рис.1, кривая 2). Аналогичное поведение обнаруживают экстремальные значения характеристик деформированного состояния.

Анализ меридионального распределения температуры вдоль внутренней поверхности оболочки (рис.2; здесь и на рис.3 кривые 1

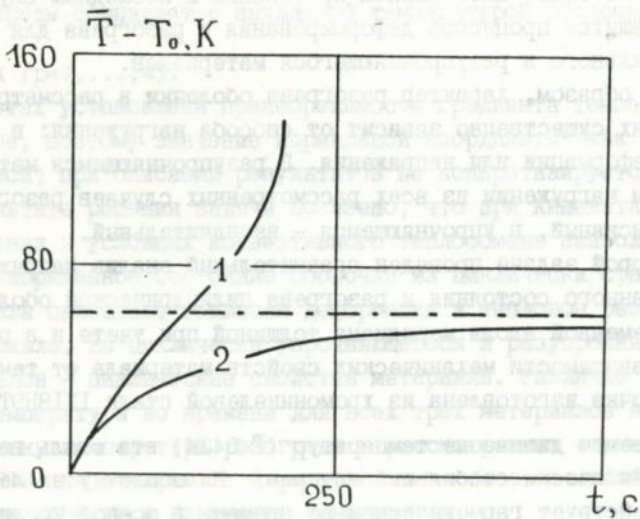


Рис. I

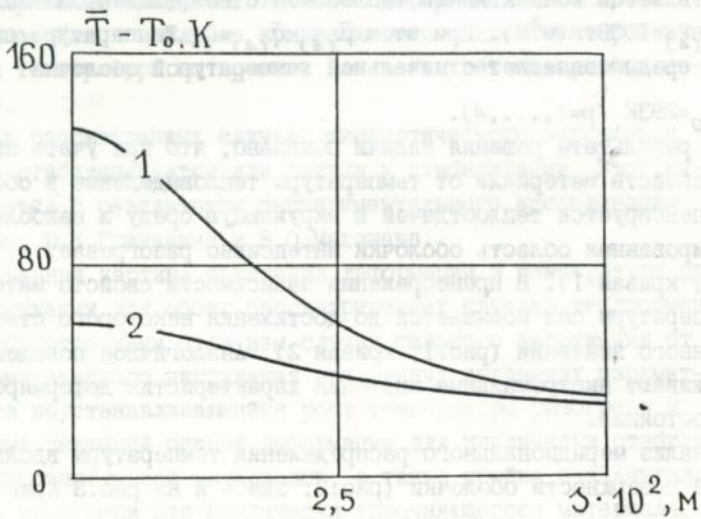


Рис. 2

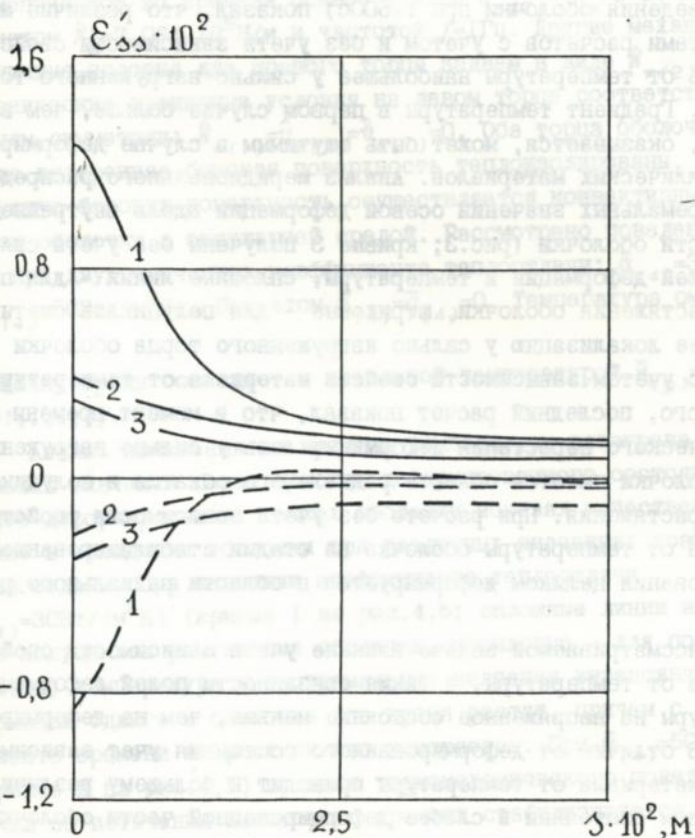


Рис.3

получены с учетом зависимости механических свойств материала от температуры для цикла нагружения, который соответствует моменту времени катастрофического нарастания экстремальных значений деформации при  $t=200\text{с}$ , кривые 2 получены в расчете без учета зависимости механических свойств материала от температуры для цикла, который соответствует практической стабилизации термомеханического поведения оболочки при  $t=500\text{с}$ ) показал, что различие между результатами расчетов с учетом и без учета зависимости свойств материала от температуры наибольшее у сильно нагруженного торца оболочки. Градиент температуры в первом случае больше, чем во втором и, оказывается, может быть ощутимым в случае деформирования металлических материалов. Анализ меридионального распределения экстремальных значений осевой деформации вдоль внутренней поверхности оболочки (рис.3; кривые 3 получены без учета связанности полей деформации и температуры, сплошные линии - для полуциклов растяжения оболочки, штриховые - для полуциклов сжатия) показал ее локализацию у сильно нагруженного торца оболочки в расчете с учетом зависимости свойств материала от температуры. Кроме этого, последний расчет показал, что в момент времени катастрофического нарастания деформации лишь у сильно нагруженного торца оболочки имеется область радиального обжатия в полуциклах осевого растяжения. При расчете без учета зависимости свойств материала от температуры оболочка на стадии стабилизированного деформирования целиком деформируется в области радиального расширения.

В рассматриваемой задаче влияние учета зависимости свойств материала от температуры, а также связанности полей деформации и температуры на напряженное состояние меньше, чем на деформированное. В отличие от деформированного состояния учет зависимости свойств материала от температуры приводит к большему различию в напряженном состоянии в слабее деформированной части оболочки.

Таким образом установлено, что результаты расчетов температуры и деформированного состояния с учетом связанности этих полей и зависимости механических свойств материала от температуры существенно отличаются от результатов, полученных без учета зависимости свойств материала от температуры. Это свидетельствует о важности учета зависимости свойств материала от температуры

при моделировании термомеханически связанных процессов.

В третьей задаче исследовано термопластически связанное поведение оболочки вращения в виде полугофра, находящейся в различных условиях теплоотдачи. Толщина оболочки изменяется вдоль меридиана по линейному закону. Оболочка изготовлена из хромоникелевой стали XIX8HЭТ. На оболочку на правом торце действует гармоническое во времени осевое усилие  $N_{z(2)} = -\hat{N}'_z/2 \cdot \sin 2\pi f t$  с размахом  $\hat{N}'_z = 7,064 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$  и частотой  $f = 1 \text{ Гц}$ . Другие механические граничные условия для правого торца задаем в виде  $\hat{N}_{r(2)} = \hat{\theta}_{s(2)} = 0$ . Механические граничные условия на левом торце соответствуют условиям симметрии:  $\hat{N}_{r(1)} = \hat{u}_{z(1)} = \hat{\theta}_{s(1)} = 0$ . Оба торца оболочки, а также внутренняя боковая поверхность теплоизолированы. Через наружную боковую поверхность осуществляется конвективный теплообмен оболочки с окружающей средой. Рассмотрено поведение оболочки при двух значениях коэффициента теплоотдачи:  $\bar{\alpha}_{(4)} = 30 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$  и  $\bar{\alpha}_{(4)} = 50 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ . При этом  $\bar{\mu}_{(4)} = \bar{q}_{(4)} = 0$ . Температура омывающей оболочку среды совпадает с начальной температурой  $\bar{\theta}_{(p)} = T_0 = 293 \text{ К}$  ( $p = 1, \dots, 4$ ).

Анализ изменения во времени температуры разогрева и экстремальных значений характеристик деформированного состояния в наиболее деформированных точках оболочки показал качественное различие в поведении оболочки при различных значениях коэффициента теплоотдачи. При значении коэффициента теплоотдачи  $\bar{\alpha}_{(4)} = 30 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$  (кривые 1 на рис. 4, 5; сплошные линии на рис. 5 - для полуциклов растяжения оболочки, штриховые - для полуциклов сжатия) температура и экстремальные значения интенсивности деформаций сдвига в оболочке все время растут, причем с некоторого момента времени их рост сильно ускоряется. При  $\bar{\alpha}_{(4)} = 50 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$  (кривые 2 на рис. 4, 5) процесс термомеханического поведения оболочки по истечении некоторого времени стабилизируется. Что касается изменения во времени напряженного состояния, то экстремальные значения интенсивности касательных напряжений изменяются весьма незначительно.

Анализ меридионального распределения экстремальных значений интенсивности деформаций сдвига вдоль внутренней поверхности оболочки (рис. 6; здесь и на рис. 7 кривые 1 получены при  $\bar{\alpha}_{(4)} = 30 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$  для цикла нагружения, который соответствует

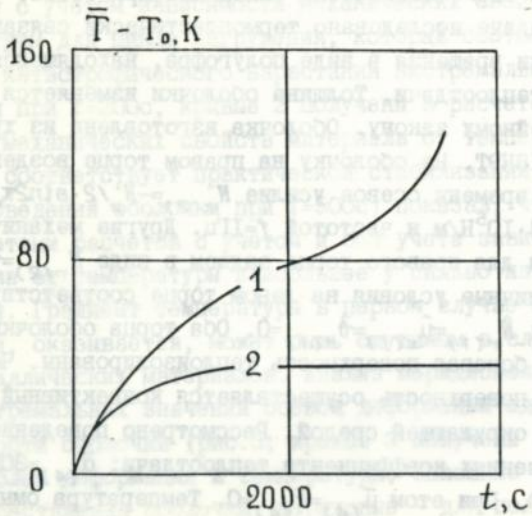


Рис.4

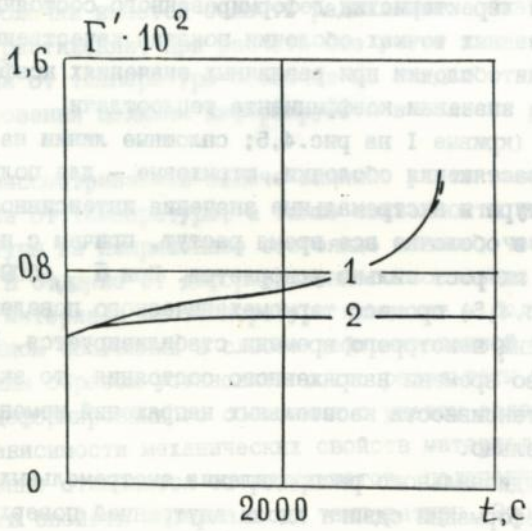


Рис.5

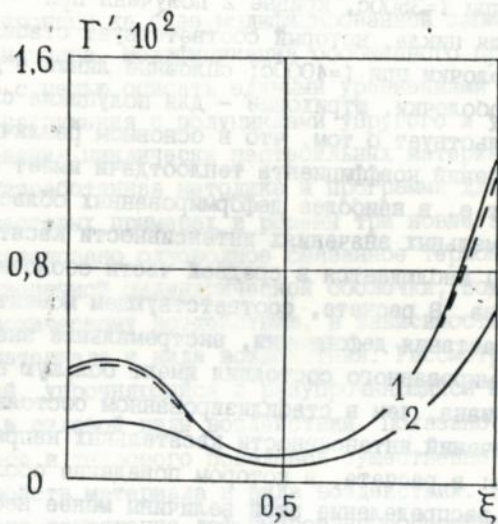


Рис. 6

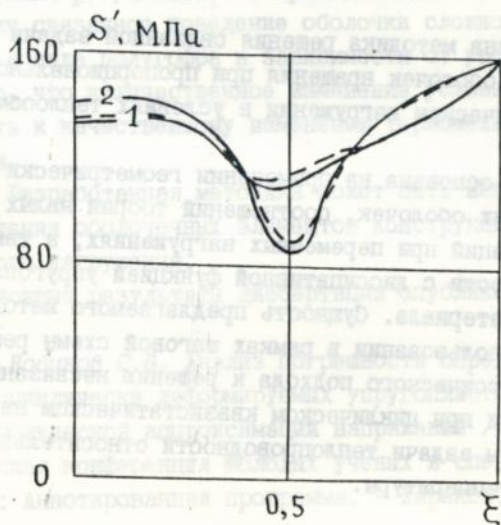


Рис. 7

моменту времени катастрофического нарастания экстремальных значений деформации при  $t=3500\text{с}$ , кривые 2 получены при  $\bar{\alpha}_{(4)}=50\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$  для цикла, который соответствует стабилизированному поведению оболочки при  $t=4000\text{с}$ ; сплошные линии - для полуцикла растяжения оболочки, штриховые - для полуцикла сжатия;  $\xi=s/s_{(2)}$  свидетельствует о том, что в основном различие в решениях для двух значений коэффициента теплоотдачи имеет место у торцов оболочки, т.е. в наиболее деформированных областях. Различие же в экстремальных значениях интенсивности касательных напряжений (рис.7) наблюдается в средней части оболочки, где эта величина минимальна. В расчете, соответствующем моменту катастрофического нарастания деформации, экстремальные значения характеристик деформированного состояния имеют большую неравномерность вдоль меридиана, чем в стабилизированном состоянии. Для экстремальных значений интенсивности касательных напряжений наблюдается обратное: в расчете, в котором поведение оболочки не стабилизируется, распределение этой величины менее неоднородно, чем в стабилизированном состоянии.

Таким образом установлено, что количественное изменение условий теплообмена оболочки может приводить к качественному изменению ее связанного термоупругопластического поведения.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Разработана методика решения связанной задачи термопластичности тонких оболочек вращения при пропорциональном квазистатическом циклическом нагружении в условиях теплообмена с окружающей средой.

2. Методика основана на применении геометрически линейных соотношений тонких оболочек, соотношений теории малых упругопластических деформаций при переменных нагружениях, а также уравнения теплопроводности с диссипативной функцией упругопластически деформируемого материала. Сущность предлагаемого метода решения заключается в использовании в рамках шаговой схемы решения связанных задач классического подхода к решению несвязанной задачи термопластичности при циклическом квазистатическом нагружении наряду с решением задачи теплопроводности относительно усредненной по времени температуры.

3. Соотношения теории малых упругопластических деформаций конкретизированы на базе модифицированной записи обобщенного принципа Мазинга. Модификация обобщенного принципа Мазинга выполнена с целью описать единими уравнениями неизотермические процессы нагружения с полциклами упругого и упругопластического деформирования циклически нестабильных материалов.

4. Разработанная методика и программа для ЭВМ апробированы на трех тестовых примерах и решены три новые задачи. В первой задаче исследовано однородное связанное термомеханическое поведение бесконечной цилиндрической оболочки, подверженной осевому упругопластическому воздействию, в зависимости от циклических свойств материала и вида воздействия. Рассмотрены циклически стабильный, упрочняющийся и разупрочняющийся материалы, кинематический и силовой виды воздействий. Показано, что характер механического и теплового поведения существенно зависит от циклических свойств материала и вида воздействия. Во второй задаче исследовано напряженно-деформированное состояние и разогрев цилиндрической оболочки линейнопеременной толщины при учете и в пренебрежении зависимостью механических свойств материала от температуры. Показано, что учет зависимости механических свойств материала от температуры необходим, т.к. может приводить к качественно иным результатам. В третьей задаче исследовано термомеханически связанное поведение оболочки сложного меридионального сечения в виде полугофра в зависимости от уровня теплоотдачи. Показано, что количественное изменение условий теплообмена может приводить к качественному изменению термомеханического поведения оболочки.

5. Разработанная методика может быть использована при оценке поведения оболочечных элементов конструкций в процессе их циклического нагружения.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. *Новилов С.В.* Анализ погрешности определения теплообразования в циклически деформируемых упругопластических телах при моногармонической аппроксимации напряжений // XVI Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов ИГМаш АН Украины: Аннотированная программа. - Харьков, 1988. - С.23-24.

2. Новиков С.В. Однородный термомеханический разогрев упругопластически деформируемого стержня из циклически нестабильного материала - Киев, 1990. - Деп в ВИНТИ 11.07.90; №3887-В90.

3. Новиков С.В. Определение связанного термоупругопластического поведения цилиндрической оболочки при осесимметричном циклическом нагружении // Термовязкоупругопластические процессы деформирования в элементах конструкций: Тезисы докладов научного совещания. - Киев, 1992. - С.66.

4. Новиков С.В. Определение усредненного диссипативного разогрева стержня при циклическом упругопластическом деформировании // Прикладная механика. - 1993. - 29, №2. - С.69-73.

5. Новиков С.В. Об приближенном определении температуры диссипативного разогрева упругопластически деформируемых тел из циклически нестабильных материалов // Сибирская школа по современным проблемам механики деформируемого твердого тела: Тезисы докладов. - Якутск, 1990. - С.128.

6. Новиков С.В. Оценка применимости моногармонической аппроксимации напряжений к анализу термомеханического поведения упругопластических тел при циклическом деформировании // Труды XIII научной конференции молодых ученых Ин-та механики АН Украины. - Киев, 1988. - Ч.1. - С.150-154. - Деп в ВИНТИ 27.12.88; №9071-В88.

7. Новиков С.В. Расчет изменения температуры материала вследствие упругопластического деформирования, моделируемого обобщенным принципом Мазинга // Труды XVI научной конференции молодых ученых Ин-та механики АН Украины. - Киев, 1989. - Ч.1. - С.148-152. - Деп в ВИНТИ 2.08.89; №5164-В89.

8. Новиков С.В. Нестационарные пружнопластичне деформування оболонок обертання при пропорційному циклічному навантаженні // XV наукова конференція молодих вчених Ін-ту механіки АН України: тези доповідей. - Київ, 1990. - С.35.

9. Шевченко Д.Н., Новиков С.В. Метод определения температурных полей термомеханического разогрева в оболочках вращения при осесимметричном циклическом пропорциональном упругопластическом деформировании // Механика неоднородных структур: Тезисы докладов третьей всесоюзной конференции. - Львов, 1991. - Ч.2. -

С.362.

Ю.Левченко Д.Н., Новиков С.В. Осесимметричная связанная задача термопластичности оболочек вращения при пропорциональном циклическом деформировании // Прикладная механика. - 1993. - 29, №. - С.26-37.

ИНИ "НАУКА" Тираж 100 экз. 24/0

2. Боблюк С.В. Структурная термомеханическая деформация при  
 термомеханической деформации стержня из аморфного полиметилметакрилата  
 в условиях одноосного растяжения // Тезисы докладов 1-го Всесоюзного симпозиума  
 по физике полимеров. - Киев, 1960. - С. 100-101.

3. Боблюк С.В. Структурная термомеханическая деформация при  
 одноосном растяжении // Термомеханическая деформация полимеров  
 и композитов. - Киев, 1960. - С. 100-101.

4. Боблюк С.В. Структурная термомеханическая деформация при  
 перегреве стержня при изотермическом упругопластическом деформиро-  
 вании // Прикладная механика. - 1963. - № 11. - С. 68-73.

5. Боблюк С.В. О кинематике деформации температуры  
 деформированного стержня упругопластически деформированного тела из  
 аморфного полиметилметакрилата // Состояние науки по сообра-  
 жениям к 100-летию металлургии деформации // Тезисы докладов  
 конференции. - Киев, 1960. - С. 100.

6. Боблюк С.В. Структурная термомеханическая деформация при  
 одноосном растяжении в условиях термомеханической деформации  
 упругопластически деформированного тела при изотермическом деформировании // Труды  
 XIII научной конференции молодых ученых АН Украины в Тернопиле,  
 - Львов, 1960. - Ч. I. - С. 160-161. - Друк № 1117. - 23.12.60;  
 № 1117-822.

7. Боблюк С.В. Структурная термомеханическая деформация при  
 одноосном растяжении в условиях термомеханической деформации  
 упругопластически деформированного тела при изотермическом деформировании  
 // Труды XIII научной конференции молодых ученых АН Украины. - Киев,  
 1960. - Ч. I. - С. 160-161. - Друк № 1117. - 23.12.60.

8. Боблюк С.В. Структурная термомеханическая деформация при  
 одноосном растяжении в условиях термомеханической деформации  
 упругопластически деформированного тела при изотермическом деформировании //  
 IV научная конференция молодых ученых АН Украины в Тернопиле,  
 - Львов, 1961. - С. 35.

9. Боблюк С.В., Боблюк С.В. Структурная термомеханическая деформация при  
 одноосном растяжении в условиях термомеханической деформации  
 упругопластически деформированного тела при изотермическом деформировании  
 // Тезисы докладов конференции. - Киев, 1961. - Ч. 2.

ИПО "КАМЕТ" Тираж 100 Заказ 37/10

464052

AB 28.389