

Н. Н. Гормахов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ УРАВНЕНИЙ
ТЕРМОУПРУГОПЛАСТИЧНОСТИ С УЧЕТОМ ТРЕТЬЕГО
ИНВАРИАНТА ДЕВИАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ

*Институт механики им С.П.Тимошенко НАНУ,
ул. Нестерова, 3, 03057, Киев, Украина; e-mail: plast@inmech.kiev.ua*

Abstract. An experimental verification of constitutive equations, which take into account the third invariant of stress deviator in the thermoelastoplastic process of deformation along the trajectory essentially deviating from the rectilinear one, is carried out. The constitutive equations contain two scalar functions, which were concretized in the basic experiments with tubular specimens presented in the form of tables. The values of scalar functions for different strains, temperatures and stress state kind are obtained using the nonlinear interpolation of data and similarity of functions for different temperatures. The method of successive approximations is proposed for calculation of stresses in a body element under the given strains.

Key words: thermoelastoplastic process of deformation; stress; strain; temperature; third invariant of stress deviator; scalar function; interpolation.

Введение.

Определяющие уравнения для описания упругопластических процессов термоупругопластического деформирования элементов тела по траекториям малой кривизны с учетом третьего инварианта девиатора напряжений сформулированы в работе [6]. Эти уравнения содержат две скалярные функции, одна из которых связывает шаровые компоненты тензоров напряжений и деформаций, а вторая – вторые инварианты девиаторов напряжений и деформаций. Обе скалярные функции являются нелинейными, зависят от температуры и вида напряженного состояния. В [6] проведена частичная проверка предложенных уравнений в процессе нагружения, который был близок к прямолинейному, отличался от базового и проходил при повышенной температуре (500°С). Выполнен также расчет деформаций элемента тела по напряжениям, которые были получены в эксперименте [6].

В настоящей статье проведено экспериментальное обоснование предложенных в [6] определяющих уравнений теории процессов малой кривизны, учитывающих вид напряженного состояния, в термоупругопластическом процессе деформирования по траектории, которая существенно отклонялась от прямолинейной. Как и в статьях [6 – 8], в качестве параметра вида напряженного состояния использован угол вида напряженного состояния ω_σ , который характеризует ориентацию октаэдрического касательного напряжения в октаэдрической плоскости относительно отрицательного направления проекции на эту плоскость главной оси, вдоль которой действует минимальное нормальное напряжение. При конкретизации зависимостей между шаровыми компонентами тензоров деформаций и напряжений, а также между вторыми инвариантами девиаторов напряжений и деформаций использована нелинейная интерполя-

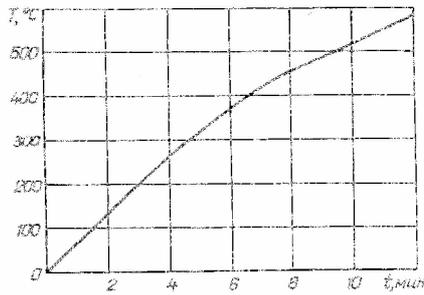


Рис. 1

Для нагрева образца использован электрический нагреватель [2], который располагался внутри трубчатого образца. Давление в полости трубчатого образца осуществлялось газом (аргоном). Измерение температуры проведено с помощью термопар, приваренных к наружной поверхности образца, а деформаций образца – с помощью электро-механического тензомера [1, 4], оснащенного тензометрическими преобразователями [3] с базой измерения по длине образца равной 20 мм. На рис. 1 показан график изменения температуры образца в зависимости от времени. Так как скорость нагрева образца была менее $70^{\circ}\text{C} / \text{мин}$, а перепад температур на измерительной базе – менее 5°C , то температурные напряжения не превысили величины 5% от силовых [5] и температурными напряжениями пренебрегали. Процесс нагружения образца длился не более пяти минут. При такой скорости нагружения деформации ползучести не превышали величины 0,001, поэтому этими деформациями пренебрегали. Чтобы исключить чисто тепловые деформации образца программа его нагрева (рис. 1) осуществлялась дважды: сначала без -, а затем с приложением нагрузок к образцу, при этом оба раза с помощью тензомера регистрировалось изменение размеров измерительной базы образца. Для определения деформации образца от действия только силовых факторов из размеров длины базы и диаметра образца, замеренных в процессе нагружения и его нагрева, вычитали эти же размеры образца, которые были получены при нагреве без приложения нагрузок.

Процесс нагружения образца начинался при температуре 373°C приложением к нему растягивающей силы до достижения осевой деформации около 5 %, а затем, при постоянной величине растягивающего усилия, образец нагружался внутренним давлением. Результаты этого эксперимента были обработаны по методике [6] и представлены в табл. 1, где приведены осевые σ_{zz} и окружные $\sigma_{\varphi\varphi}$ напряжения; осевые ε_{zz} , окружные $\varepsilon_{\varphi\varphi}$ и радиальные ε_{rr} деформации; угол вида напряженного состояния ω_{σ} , а также температура образца T .

Таблица 1

σ_{zz} , МПа	$\sigma_{\varphi\varphi}$, МПа	$\varepsilon_{zz} \cdot 10^3$	$\varepsilon_{\varphi\varphi} \cdot 10^3$	$\varepsilon_{rr} \cdot 10^3$	ω_{σ} , град.	$T^{\circ}\text{C}$
140,9	0	4	-1,8	-1,8	60	373
190,1	0	11,1	-5,2	-5,2	60	426
227,5	0	21,2	-10,1	-10,1	60	438
247	0	30,5	-14,5	-14,5	60	449
268,2	0	38,7	-18,5	-18,5	60	457
286,2	0	46	-21,9	-21,9	60	466
297,5	0	53,4	-25,3	-25,3	60	480
313,4	31,9	66,1	-33,3	-28,7	57,7	498
335,8	78,5	81,1	-45,1	-30,2	53,8	529
356	112,3	96,4	-57,8	-30,7	50,5	538
365,4	123,3	109,6	-68,6	-31,1	48,5	543
372,8	134	123	-79,3	-31,5	47	547
375,9	138,2	141,1	-93,3	-32,1	45,4	560
382,5	149,2	158,4	-105,5	-33,4	44,7	573
397,1	177,1	196	-131,8	-35,5	43,4	582

ция базовых экспериментов по параметру ω_{σ} . Предложен метод последовательных приближений для расчета напряжений в элементе тела по заданным деформациям [9, 10].

Экспериментальная проверка определяющих уравнений проведена на образцах из стали X18H10T согласно методике, изложенной в работе [6]. Испытания проводили на установке, созданной на основе испытательной машины ZDMU 30, оснащенной системами нагрева и нагружения трубчатого образца [5]. Для на-

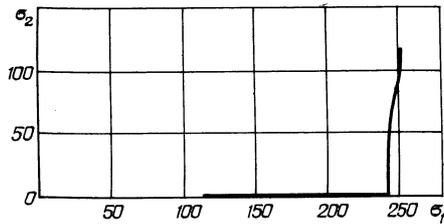


Рис. 2

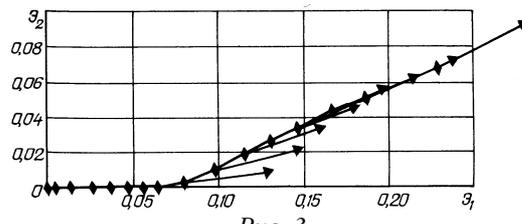


Рис. 3

На рис. 2 показана траектория нагружения для этого процесса в плоскости $\sigma_1 - \sigma_2$ пятимерного пространства напряжений, а на рис. 3 – образ процесса нагружения в пространстве $Y_1 - Y_2$ необратимых деформаций. Компоненты σ_1 , σ_2 , Y_1 и Y_2 определены по формулам [11]:

$$\sigma_1 = s_{11} \sqrt{\frac{3}{2}}; \quad \sigma_2 = \sqrt{2} \left(\frac{1}{2} s_{11} + s_{22} \right); \quad Y_1 = e_{11}^{(p)} \sqrt{\frac{3}{2}}; \quad Y_2 = \left(\frac{1}{2} e_{11}^{(p)} + e_{22}^{(p)} \right) \sqrt{2}, \quad (1)$$

где s_{11} , s_{22} , $e_{11}^{(p)}$ и $e_{22}^{(p)}$ – компоненты девиаторов напряжений и необратимой деформации, которые вычисляли по напряжениям и деформациям, найденным в эксперименте следующим образом:

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_0 \delta_{ij}; \quad e_{ij}^{(p)} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_0 \delta_{ij} - s_{ij} / 2G(T); \quad (2)$$

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}; \quad \varepsilon_0 = \frac{1}{3} \varepsilon_{ij} \delta_{ij}; \quad G(T) - \text{модуль сдвига.} \quad (3)$$

Как видно из рис. 2, этот процесс является процессом нагружения по траектории, которая близка к траектории двузвенной ломаной с углом излома, равным $\pi/2$. На рис. 3 также видим, что после точки излома вектор напряжения отклоняется от касательной к траектории необратимой деформации на угол, равный 10° . После исчерпания следа запаздывания векторных свойств материала вектор напряжения и касательная к траектории необратимого деформирования практически совпадают между собой. В рассматриваемом процессе полное исчерпание явления запаздывания векторных свойств материала после точки излома траектории нагружения наблюдалось на отрезке по интенсивности деформации сдвига около 5%.

Проведем проверку определяющих уравнений, предложенных в работе [6], в процессе термоупругопластического деформирования, показанного на рис. 3. Для проведения этого расчета необходимо конкретизировать зависимости между шаровыми компонентами тензоров деформаций и напряжений (функция F_1), а также между вторыми инвариантами девиаторов деформаций и напряжений (функция F_2). В работе [6] при конкретизации функций F_1 и F_2 выполнена линейная интерполяция данных базовых экспериментов. В качестве базовых использованы результаты экспериментов на одноосное растяжение ($\omega_\sigma = \pi/3$) при температурах 20, 100, 200, 300, 400, 500, 600°C и при сложном напряженном состоянии ($\omega_\sigma = \pi/6, 0$) при температурах 20, 500°C. Линейное интерполирование по этим данным приводило к погрешностям, обусловленным наличием большого интервала температур (480°C) при сложном напряженном состоянии. Для того, чтобы уменьшить погрешность интерполяции функций F_1 и F_2 желательно иметь значения этих функций для температур 100, 200, 300, 400, 600°C при сложном напряженном состоянии ($\omega_\sigma = \pi/6, 0$).

Результаты базовых экспериментов на растяжение ($\omega_\sigma = \pi/3$) показывают, что зависимость между шаровыми компонентами тензоров деформаций и напряжений F_1

для разных температур подобны между собой и коэффициент подобия q_1 , равный отношению величин функции F_1 для фиксированной величины ε_0 , но разных температур T_1 и T_2 , слабо зависит от ε_0 . Отношение

$$q_1 = F_1(T_2) / F_1(T_1), \quad (4)$$

усредненное по нескольким значениям ε_0 , при $T_1 = 20^\circ\text{C}$ и $T_2 = 500^\circ\text{C}$, согласно данным табл. 3 работы [6], равно 0,74. Для других видов напряженного состояния ($\omega_\sigma = \pi/6, 0$) и тех же температур усредненные значения коэффициента q_1 равны, соответственно, 0,65 и 0,74.

В случае функции F_2 коэффициент подобия q_2 для простого растяжения, равный отношению величин функции F_2 при фиксированной величине интенсивности деформаций сдвига Γ , но для разных температур T_1 и T_2 , также слабо зависит от Γ . Отношение

$$q_2 = F_2(T_2) / F_2(T_1) \quad (5)$$

для одноосного растяжения, усредненное по нескольким значениям Γ , для $T_1 = 20^\circ\text{C}$ и $T_2 = 500^\circ\text{C}$ по данным табл. 3 работы [6] равно 0,71. Для видов напряженного состояния, которые характеризуются значениями параметра $\omega_\sigma = \pi/6$ и $\omega_\sigma = 0$ и тех же температур, усредненное значение q_2 одинаково и равно 0,66.

Из вышеприведенных данных можно сделать вывод о том, что величины коэффициентов подобия q_1 и q_2 для разных видов напряженного состояния близки между собой и необходимые значения скалярных функций F_1 и F_2 при сложном напряженном состоянии можно вычислить, используя коэффициенты подобия, полученные в экспериментах на растяжение при разных температурах. Например, значение функции F_1 при температуре T_i , в виде напряженного состояния $(\omega_\sigma)_j$ и шаровом тензоре деформации $(\varepsilon_0)_k$ можно определить по формуле

$$F_1(T_i) = q_1(\varepsilon_0) \cdot F_1(T_1), \quad (6)$$

где $F_1(T_1)$ – значение F_1 при виде напряженного состояния $(\omega_\sigma)_j$, шаровом тензоре деформаций $(\varepsilon_0)_k$ и температуре $T_1 = 20^\circ\text{C}$, а $q_1(\varepsilon_0)$ определяли согласно (4) в опытах на одноосное растяжение ($\omega_\sigma = \pi/3$) при $\varepsilon_0 = (\varepsilon_0)_k$ для температур $T_1 = 20^\circ\text{C}$ и $T_2 = T_i$.

Используя аналогичную зависимость, можно вычислять значения базовой функции F_2 при температуре T_i , виде напряженного состояния $(\omega_\sigma)_j$ и интенсивности деформаций сдвига Γ_k согласно равенству

$$F_2(T_i) = q_2(\Gamma_k) \cdot F_2(T_1), \quad (7)$$

где $F_2(T_1)$ – значения F_2 при виде напряженного состояния $(\omega_\sigma)_j$, интенсивности деформаций сдвига Γ_k и температуре $T = 20^\circ\text{C}$, а $q_2(\Gamma_k)$ определяли в опытах на одноосное растяжение ($\omega_\sigma = \pi/3$) при интенсивности деформаций сдвига Γ_k для температур $T_1 = 20^\circ\text{C}$ и $T_2 = T_i$.

В табл. 2, 3 приведены величины функций F_1 и F_2 , рассчитанные для температур 100, 200, 300, 400, 500, 600 $^\circ\text{C}$, $\omega_\sigma = \pi/6$ и $\omega_\sigma = 0$ по формулам (6), (7). Экспериментальные значения функции F_1 (табл. 3 [6]) и данные этой функции, полученные в расчете по формуле (6), отличаются для $\omega_\sigma = \pi/6$ и $\omega_\sigma = 0$ при температуре 500 $^\circ\text{C}$, соответственно, на 11,1 и 8,8 %. Расхождение между экспериментальными (табл. 4 [6]) и расчетными по формуле (7) значениями функции F_2 для температуры 500 $^\circ\text{C}$ и $\omega_\sigma = \pi/6$, $\omega_\sigma = 0$ составило, соответственно, 10,1 и 6,3%.

При проведении расчета с использованием уравнений, предложенных в работе [6], весь процесс деформирования, данные которого приведены в табл. 1, был разбит на этапы.

Таблица 2

$(\varepsilon_0 - \varepsilon_T) \cdot 10^4$	$T, ^\circ\text{C}$					
	100	200	300	400	500	600
	$F_1, \text{МПа при } \omega_\sigma = \pi / 6$					
1	42,9	41,6	40,4	38	34,9	28,7
2	80,1	76,9	67,6	64,3	60,5	53,8
4	154,5	147,7	131,6	128,5	122,4	110,8
6	184,2	175,5	158,7	155,6	150,3	136,5
8	190,8	180,8	163,9	161,2	157,6	142
10	193,7	183,1	167,1	163,9	161,3	144,7
14	198,7	188,3	174,5	169,9	167,4	149,7
18	205,1	193,5	180,3	175	171,5	154,9
24	211,9	198,6	186,6	180,4	174,8	159,7
30	218,1	202,7	190,9	184,8	178,6	164,3
$(\varepsilon_0 - \varepsilon_T) \cdot 10^4$	$F_1, \text{МПа при } \omega_\sigma = 0$					
1	47,1	45,6	43	39,4	32,5	48,5
2	80,2	70,5	67,1	63,1	56,2	83,6
4	159,5	142,1	138,7	132,1	119,6	166,8
6	206,6	186,8	183,2	176,9	160,7	216,9
8	215,9	195,8	192,6	188,2	169,7	228
10	223,1	203,7	199,7	196,6	176,3	236,1
14	233,6	216,6	210,7	207,6	185,8	246,6
18	242,2	225,7	219,1	214,7	193,9	256,7
24	251,6	236,4	228,6	221,5	202,3	268,5
30	258	243	235,2	227,4	209,1	277,6
40	262,6	247,8	240,5	232,1	214,5	286,3
60	274,3	259,2	251,8	242,5	224,1	303,6

Таблица 3

$\tilde{A} \cdot 10^3$	$T, ^\circ\text{C}$					
	100	200	300	400	500	600
	$F_2, \text{МПа при } \omega_\sigma = \pi / 6$					
1	50,6	49,8	38,3	37,9	37,1	36,9
5	100,1	95,7	75,1	70,8	67,7	67,3
10	124,1	117,5	97,2	93,2	89,4	86,8
20	146,3	138,6	120,6	118,3	112,9	105,6
40	179,9	170,1	153,3	151,3	148,7	135,1
60	200	189,2	175,1	170,7	168,7	151,8
80	213,2	199,6	187,3	181,2	175,9	161,3
100	222,6	205,2	193,2	187,4	181,3	167,7
$\tilde{A} \cdot 10^3$	$F_2, \text{МПа при } \omega_\sigma = 0$					
1	64,8	63,8	49,1	48,6	47,6	47,3
5	112,6	107,6	84,4	79,6	76,1	75,6
10	141,6	134	110,9	106,4	102	99
20	164,3	155,7	135,5	132,9	126,8	118,6
40	197	186,2	167,8	165,6	162,8	147,9
60	218,1	206,3	191	186,2	184	165,5
80	237,3	222,1	208,4	201,7	195,8	179,5
100	249,5	230	216,5	210,1	203,2	188
120	263,9	239,9	227,1	220,4	212	196,2

В конце каждого этапа деформирования рассчитывали величины шарового тензора деформаций ε_o и параметра Удквиста Γ_y . При вычислении параметра Удквиста Γ_y предполагалось, что его величина на n -ом этапе деформирования равна сумме приращений полных интенсивностей деформаций сдвига за предыдущие этапы деформирования. По вычисленным значениям ε_o , Γ_y для заданной температуры T и вида напряженного состояния ω_σ проводился процесс интерполирования функций F_1 и F_2 с использованием данных табл. 2, 3. Рассмотрим процесс интерполяции этих функций на примере функции F_1 . Сначала выполним линейную интерполяцию зависимости F_1 по ε_o и T для трех видов напряженного состояния: $\omega_\sigma = \pi/3, \pi/6$ и 0 . При этом для этих видов напряженного состояния получим три величины шарового тензора напряжений σ_o для заданных ε_o и T . Затем вычислим разделенные разности шарового тензора напряжений σ_o первого и второго порядка по параметру вида напряженного состояния ω_σ и, используя квадратичную интерполяцию по виду напряженного состояния, рассчитаем величину σ_o для заданной величины параметра ω_σ .

Аналогично по заданным в конце этапа деформирования величинам T , ω_σ , Γ_y с использованием данных табл. 3 определяли величину интенсивности касательных напряжений S для n -ого этапа деформирования.

Для вычисления компонент девиатора напряжений воспользуемся зависимостью, которая связывает приращение необратимых деформаций $\Delta e_{ij}^{(p)}$ с компонентами девиатора напряжений s_{ij} , интенсивностью касательных напряжений S и приращением интенсивности пластических деформаций сдвига $\Delta \Gamma^{(p)}$ на n -ом этапе деформирования,

$$\Delta e_{ij}^{(p)} = \frac{s_{ij}}{S} \Delta \Gamma^{(p)}. \quad (8)$$

Разрешив уравнение (8) относительно компонент девиатора напряжений, получим

$$s_{ij} = \frac{\Delta e_{ij}^{(p)}}{\Delta \Gamma^{(p)}} S. \quad (9)$$

Для вычисления компонентов девиатора напряжений по (9) необходимо знать $\Delta e_{ij}^{(p)}$ и $\Delta \Gamma^{(p)}$. Однако они не известны, так как не известны величины упругих деформаций. Поэтому в первом приближении будем полагать, что приращение девиатора необратимых деформации и приращение интенсивности сдвига необратимых деформаций равны, соответственно, приращению полных деформаций и приращению параметра Удквиста за n -ый этап деформирования. Подставляя в (9) эти величины на n -ом этапе деформирования, а также интенсивность касательных напряжений S , полученную путем интерполирования функции F_2 , вычисляем компоненты девиатора тензора напряжений. Суммируя эти компоненты и компоненты шарового тензора напряжений, полученные путем интерполирования функции F_1 , определяем компоненты тензора напряжений в первом приближении. Затем по полученным величинам девиатора напряжений вычисляем компоненты девиатора упругих деформаций $e_{ij}^{(e)}$. Вычитая из полученных в эксперименте компонентов девиатора деформаций их упругие составляющие $e_{ij}^{(e)}$, получаем компоненты девиатора необратимых деформаций $e_{ij}^{(p)}$ в конце n -ого этапа деформирования.

По $e_{ij}^{(p)}$ в конце n -го этапа деформирования находим приращения необратимой деформации за этот этап $\Delta e_{ij}^{(p)}$ и приращение интенсивности необратимых деформаций сдвига

$$\Delta \Gamma^{(p)} = (0,5 \Delta e_{ij}^{(p)} \Delta e_{ij}^{(p)})^{0,5}. \quad (10)$$

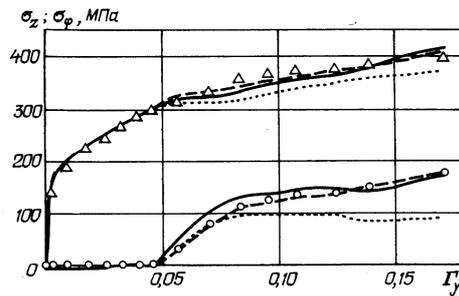


Рис. 4

Подставляя приращение величины $\Delta \Gamma^{(p)}$ и $\Delta e_{ij}^{(p)}$ за n -ый этап деформирования в (9), получаем величину компонентов девиатора напряжений во втором приближении. Так как различие между первым и вторым приближениями при вычислении компонентов тензора напряжений не превышало величины 0,4%, то ограничимся только двумя приближениями при вычислении компонентов тензора напряжений.

Компоненты напряжений, полученные в эксперименте и вычисленные по уравнениям работы [6], приведены на рис. 4 в зависимости от величины параметра Удквиста Γ_y . Треугольниками показаны экспериментально полученные осевые (σ_z), а кружками – окружные (σ_ϕ) напряжения. Компоненты осевых и окружных напряжений, вычисленных по уравнениям работы [6], показаны сплошной линией.

Расчет этого термоупругопластического процесса деформирования был проведен по тем же уравнениям, но без учета влияния вида напряженного состояния. Результаты этого расчета показаны на рис. 4 пунктирной линией. Расхождение данных эксперимента для осевых напряжений с результатами расчета по уравнениям с учетом влияния вида напряженного состояния не превысило величины 4,3 % в конце процесса деформирования, а для уравнений без учета влияния вида напряженного состояния – 10,3 %. Расхождение по величинам окружных напряжений составило 7,3 % для уравнений, учитывающих вид напряженного состояния, и 48,3 % – без учета влияния вида напряженного состояния.

В вышеприведенных расчетах этого процесса деформирования использовано допущение теории процессов малой кривизны, согласно которому направление вектора напряжения совпадает с направлением касательной к траектории необратимой деформации. Однако, в этом процессе в пределах следа запаздывания векторных свойств материала наблюдалось отклонение от соосности этих векторов. Для оценки влияния несоосности векторов напряжения и касательной к траектории необратимой деформации был проведен расчет этого процесса деформирования с использованием экспериментально полученных компонент направляющего девиатора напряжений s_{ij}^e / S^e , где s_{ij}^e , S^e – компоненты девиатора напряжения и интенсивность касательных напряжений, которые были измерены в эксперименте. Т.е. при расчете компонент девиатора напряжений использовано не уравнение (9), а следующая зависимость:

$$s_{ij} = \frac{s_{ij}^e}{S^e} S. \quad (11)$$

Результаты этого расчета показаны на рис. 4 штриховой линией. Видно, что результаты этого расчета лучше описывают экспериментальные данные на участке, где наблюдается эффект запаздывания векторных свойств материала. Наибольшее расхождение между данными этого расчета и данными расчета по уравнениям работы [6], показанными сплошной линией, наблюдаются в пределах следа запаздывания векторных свойств материала. На этом участке эти расхождения не превышают величины 3 % для осевых и 15 % – для окружных напряжений. Большое процентное расхождение для окружных напряжений, в основном, объясняется тем, что эти напряжения по модулю меньше, чем осевые. За пределами следа запаздывания результаты, показанные штриховой и сплошной линиями, практически совпадают.

Заключение.

Проведено экспериментальное обоснование определяющих уравнений, учитывающих третий инвариант девиатора напряжений, в термоупругопластическом процессе деформирования по траектории, которая существенно отклонялась от прямолинейной. Определяющие уравнения содержат две скалярные функции, которые конкретизируются в базовых экспериментах с трубчатыми образцами, данные которых представлены в табличном виде. Значения скалярных функций для не приведенных в таблицах значений деформации, температуры и вида напряженного состояния получали, используя нелинейную интерполяцию данных экспериментов и подобие этих функций по температуре. Предложен метод последовательных приближений для расчета напряжений в элементе тела по заданным деформациям. Показано, что определяющие уравнения теории процессов малой кривизны с предложенной методикой конкретизации скалярных функций, входящих в них, удовлетворительно описывают неизоэргические процессы нагружения по траектории двузвенной ломаной на $\pi/2$ в пространстве напряжений и учет влияния вида напряженного состояния позволяет точнее описать такие упругопластические процессы. Приведенные результаты также свидетельствуют о том, что для получения более точных результатов расчетов в пределах следа запаздывания необходимо использовать более сложную теорию, например, теорию процессов нагружения по траектории двухзвенной ломаной.

Р Е З Ю М Е . Проведено експериментальне обґрунтування рівнянь, що враховують третій інваріант девиатора напружень, в термопружнопластичному процесі деформування по траєкторії, яка суттєво відхилялася від прямолінійної. Визначальні рівняння містять дві скалярні функції, які конкретизовано в базових експериментах з трубчастими зразками, дані яких подано в вигляді таблиць. Значення скалярних функцій для величин деформацій, температури та виду напруженого стану отримано, використовуючи нелінійну інтерполяцію даних і подібність функцій по температурі. Запропоновано метод послідовних наближень для розрахунку напружень в елементі тіла по заданих деформаціях.

1. А.с. СССР №1288492 МКИ G-01В 5/30. Тензомер. (Тормахов Н.Н., Гемма С.П., Захаров С.М., Марищук А.В.) // Бюлл. – 1987. – № 5. – 2 с. – (Опубл. 07.02.87).
2. Декларативний патент на винахід UA 41811 А. МКВ(6) кл. G01N3/18. Пристрій для довготривалих випробувань трубчастих зразків за умов високої температури (Тормахов М.М.) // Промислова власність. – 2001. – № 8. – (Опубл. 17.09.01).
3. Декларативний патент на корисну модель UA № 14151 МПК⁶ кл. G 01 В 7/00, G 01 В 1/00 Тензопретворювач (Тормахов М.М.) // Промислова власність. – 2006. – № 5. – (Опубл. 15.05.06).
4. Тормахов Н.Н. Тензомер для высокотемпературных испытаний // Завод. лаборатория. – 1994. – № 9. – С. 58 – 59.
5. Шевченко Ю.Н., Терехов Р.Г. Физические уравнения термовязкопластичности. – К.: Наук. думка, 1982. – 240 с.
6. Шевченко Ю.Н., Тормахов Н.Н. Определяющие уравнения процессов термопластичности по траекториям малой кривизны, учитывающие вид напряженного состояния материала // Прикл. механика. – 2010. – 46, № 6. – С. 3 – 16.
7. Babeshko M.E., Shevchenko Yu.N., Tormakhov N.N. Approximate Description of the Inelastic Deformation of an Isotropic Material with Allowance for the Stress Mode // Int. Appl. Mech. – 2010. – 46, N 2. – P. 139 – 148.
8. Babeshko M.E., Shevchenko Yu.N., Tormakhov N.N. Constitutive Equations of Elastoplastic Isotropic Materials that Allow for the Stress Mode // Int. Appl. Mech. – 2009. – 45, N 11. – P. 1189 – 1195.
9. Galishin A.Z. Axisymmetric Thermoviscoelastoplastic State of Thin Laminated Shells Made of a Damageable Material // Int. Appl. Mech. – 2008. – 44, N 4. – P. 431 – 441.
10. Galishin A.Z., Shevchenko Yu.N. Calculating the Thermoelastic Stress State of Medium-Thickness Shells of Revolution // Int. Appl. Mech. – 2008. – 44, N 5. – P. 526 – 533.
11. Shevchenko Yu.N., Tormakhov N.N., Terekhov R.G. Isotropy Postulate for Finite Deformation // Int. Appl. Mech. – 1999. – 35, N 1. – P. 13 – 24.

Поступила 22.12.2009

Утверждена в печать 21.10.2010