

М. Е. Бабешко, Ю. Н. Шевченко, Н. Н. Тормахов

**О ТЕОРИИ ТЕРМОВЯЗКОПЛАСТИЧНОСТИ, УЧИТЫВАЮЩЕЙ
ТРЕТИЙ ИНВАРИАНТ ДЕВИАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ**

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

Abstract. An applicability of three variants of constitutive equations is considered to describe the processes of thermoviscoplastic deformation of isotropic materials. It is shown that the equations of thermoviscoplasticity taking into account the third invariant of stress deviator describe adequately the experimental data.

Key words: thermoviscoplasticity, isotropic material, three variants of constitutive equations, third invariant of stress deviator, experimental data.

Введение.

Известно [3, 10, 16], что характеристики некоторых первоначально изотропных поликристаллических материалов в условиях ползучести зависят от вида напряженного состояния. В ряде работ [3, 6, 9 – 11, 16, 17] предложены определяющие уравнения, описывающие процессы изотермического деформирования таких материалов с использованием базовых экспериментов на растяжение, сжатие и кручение. В настоящей работе для описания процессов термовязкопластического деформирования таких материалов использованы определяющие уравнения [15]. Эти уравнения обобщают предложенные ранее уравнения термопластичности [14] и описывают процессы термовязкоупругопластического деформирования изотропных материалов по траекториям малой кривизны с учетом зависимости их свойств от температуры и вида напряженного состояния (ВНС). В уравнениях [15] для характеристики ВНС использован угол ВНС [1], который вычисляется через второй и третий инварианты девиатора напряжений. Уравнения [15] связывают компоненты тензоров условных напряжений и отнормированных деформаций, которые в дальнейшем называем деформациями. Они записаны в предположении, что деформации состоят из упругих и неупругих составляющих, а девиаторы напряжений и дифференциалов неупругих деформаций соосны. Уравнения содержат две нелинейные зависимости, вычисляемые по результатам экспериментов. Одна из них выражает связь между первыми инвариантами тензоров напряжений и деформаций, а вторая – связь между вторыми инвариантами соответствующих девиаторов. Для конкретизации этих зависимостей используют две серии базовых опытов на пропорциональное нагружение трубчатых образцов при различных постоянных значениях угла ВНС и нескольких значениях температуры из рассматриваемого диапазона. В первой серии проводят опыты на мгновенное деформирование образцов, т. е. со скоростями нагружения, не влияющими на форму получаемых зависимостей. Во второй серии выполняют опыты на ползучесть, сопряженные с опытами первой серии по скоростям первоначального нагружения. При предположениях о линейной связи между первыми инвариантами тензоров напряжений и деформаций и независимости от ВНС связи между вторыми инвариантами соответствующих девиаторов рассматриваемые определяющие уравнения превращаются в соотношения теории процессов деформирования по траекториям малой кривизны [2], кото-

рые совпадают с широко используемыми [2, 12, 13 и др.] уравнениями теории пластического течения [1, 2, 8, 18 и др.], ассоциированными с условием Мизеса.

В работах [14, 15] проведена экспериментальная проверка положенных в основу определяющих уравнений термовязкопластичности предположений о соосности девиаторов напряжений и дифференциалов неупругих деформаций и входящих в эти уравнения нелинейных зависимостей.

В развитие [14, 15] в данной работе выполнена проверка уравнений термовязкопластичности путем сопоставления экспериментальных значений компонент деформаций с вычисленными по данным уравнениям значениями этих компонент в предположении, что значения напряжений заданы. Кроме того, проведена также аналогичная проверка варианта [4] этих уравнений в случае, когда связь между первыми инвариантами тензоров напряжений и деформаций принята в линейном виде.

§1. Уравнения термовязкопластичности.

Определяющие уравнения [15], связывающие компоненты тензоров напряжений σ_{ij} и деформаций ε_{ij} в процессах неизотермического нагружения по траекториям малой кривизны с учетом ВНС, представлены в виде

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + (K - 2G)\varepsilon_0\delta_{ij} - \sigma_{ij}^{(d)}; \quad (1.1)$$

$$\sigma_{ij}^{(d)} = 2G \left[e_{ij}^{(n)} + \frac{1+\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_T + \varepsilon_0^{(p)} + \varepsilon_0^{(c)}) \delta_{ij} \right], \quad (1.2)$$

где $K = E/(1-2\nu)$; $E = 2G(1+\nu)$; $\varepsilon_T = \alpha_T(T - T_0)$; E , ν и α_T – модуль упругости, коэффициент Пуассона и коэффициент линейного теплового расширения материала, зависящие от температуры T ; T_0 – начальная температура; $e_{ij}^{(n)}$ – компоненты девиатора неупругих деформаций; $\varepsilon_0^{(p)} = \varepsilon_{ii}^{(p)}/3$ и $\varepsilon_0^{(c)} = \varepsilon_{ii}^{(c)}/3$ – первые инварианты тензоров деформаций пластичности и ползучести соответственно.

При проведении вычислений с использованием уравнений (1.1) процесс нагружения необходимо разбить на ряд этапов. В конце произвольного N -го этапа компоненты девиатора неупругих деформаций определяются как суммы их приращений

$$e_{ij}^{(n)} = \sum_{k=1}^N \Delta_k e_{ij}^{(n)}. \quad (1.3)$$

Для определения $\varepsilon_0^{(p)}$ и $\varepsilon_0^{(c)}$ используем зависимость между первыми инвариантами тензоров напряжений $\sigma_0 = \sigma_{ii}/3$ и деформаций $\varepsilon_0 = \varepsilon_{ii}/3$ вида

$$\sigma_0 = F_1(\varepsilon_0^*, T, \omega_\sigma) \quad (1.4)$$

$$\varepsilon_0^* = \varepsilon_0 - \varepsilon_T - \varepsilon_0^{(c)}; \quad (1.5)$$

$$\varepsilon_0^{(c)} = \sum_{k=1}^N \Delta_k \varepsilon_0^{(c)}; \quad (1.6)$$

$$\omega_\sigma = \frac{1}{3} \arccos \left[-\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{I_3(D_\sigma)}{S^3} \right] \quad (0 \leq \omega_\sigma \leq \pi/3); \quad (1.7)$$

ω_σ – угол ВНС; $I_3(D_\sigma) = |s_{ij}|$ – третий инвариант девиатора напряжений D_σ ; $s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_0\delta_{ij}$ – компоненты девиатора напряжений; S – интенсивность касательных напряжений

$$S = \left(s_{ij} s_{ij} / 2 \right)^{1/2}. \quad (1.8)$$

Приращение $\Delta_k e_{ij}^{(n)}$ на произвольном этапе нагружения определяется выражением

$$\Delta_k e_{ij}^{(n)} = \left\langle \frac{s_{ij}}{S} \right\rangle_k \Delta_k \Gamma^{(n)}, \quad (1.9)$$

где $\Delta_k \Gamma^{(n)}$ – приращение интенсивности неупругих деформаций сдвига,

$$\Delta_k \Gamma^{(n)} = \Delta_k \Gamma^{(p)} + \Delta_k \Gamma^{(c)}, \quad (1.10)$$

$\Delta_k \Gamma^{(p)}$ и $\Delta_k \Gamma^{(c)}$ – приращения интенсивностей мгновенных накопленных пластических деформаций сдвига и деформаций ползучести. Угловыми скобками в (1.9) обозначено среднее за этап значение заключенной в них величины. Для определения $\Delta_k \Gamma^{(p)}$ используем предположение о существовании зависимости вида

$$S = F_2(\Gamma^*, T, \omega_\sigma), \quad (1.11)$$

где Γ^* – интенсивность мгновенных деформаций сдвига,

$$\Gamma^* = \frac{S}{2G} + \Gamma^{(p)}; \quad \Gamma^{(p)} = \sum_{k=1}^N \Delta_k \Gamma^{(p)}. \quad (1.12)$$

Функции F_1 (1.4) и F_2 (1.11) вычисляем по результатам первой серии вышеупомянутых базовых опытов на пропорциональное нагружение трубчатых образцов, как это описано в [5, 7, 14, 15]. Для определения $\Delta_k \varepsilon_0^{(c)}$ и $\Delta_k \Gamma^{(c)}$ используем результаты второй серии базовых опытов на деформирование образцов в условиях ползучести. В [15] предложено использование аппроксимирующих выражений вида

$$\dot{\Gamma}^{(c)}(S, T, \omega_\sigma) = \exp(c_2 \ln(c_1 S) + c_3 + c_4 T + c_5 \omega_\sigma + c_6 \omega_\sigma^2); \quad (1.13)$$

$$\dot{\varepsilon}_0^{(c)}(\sigma_0, T, \omega_\sigma) = \exp(d_2 \ln(d_1 \sigma_0) + d_3 + d_4 T + d_5 \omega_\sigma + d_6 \omega_\sigma^2), \quad (1.14)$$

где c_i, d_i ($i = 1, \dots, 6$) – коэффициенты, вычисленные из условия наилучшей аппроксимации выражениями (1.13), (1.14) экспериментальных данных. Тогда имеем

$$\Delta_k \varepsilon_0^{(c)} = \dot{\varepsilon}_0^{(c)} \Delta_k t; \quad \Delta_k \Gamma^{(c)} = \dot{\Gamma}^{(c)} \Delta_k t \quad (\Delta_k t = t_k - t_{k-1} - \text{продолжительность этапа}). \quad (1.15)$$

Заметим, что приведенные определяющие уравнения могут быть использованы в упрощенном варианте [4], когда вместо (1.4) принимается линейная зависимость между первыми инвариантами тензоров напряжений и деформаций.

§2. Алгоритм расчета процесса деформирования трубчатого образца.

Методика проведения экспериментов на трубчатых образцах и способы построения зависимостей (1.4), (1.11) подробно описаны в [4, 5, 7, 14, 15]. Эксперименты проведены при различных постоянных и переменных соотношениях растягивающей осевой силы и внутреннего давления при разных значениях температуры и скоростях нагружения, как не влияющих на форму деформационных кривых, так и оказывающих существенное влияние на эти кривые. В этих экспериментах напряженное состояние образца характеризуется осевым и окружным напряжениями σ_{11}, σ_{22} ; радиальное напряжение является пренебрежимо малым по сравнению с σ_{11}, σ_{22} , т.е. $\sigma_{33} = 0$. Деформированное состояние характеризуется осевой, окружной и радиальной компонентами тензора деформаций $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}$, причем $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}$ были измерены, а значения ε_{33} рассчитаны, как это описано в [5, 15].

При проведении расчетов деформированного состояния образца напряжения принимаем заданными. Должны быть заданы модуль упругости материала, коэффициент Пуассона и коэффициент линейного теплового расширения. Зависимости (1.4) и (1.11) также принимаем известными, полученными в результате базовых экспериментов на пропорциональное нагружение трубчатых образцов при значениях угла $\omega_\sigma = 0, \pi/6, \pi/3$ при нескольких значениях температуры в диапазоне рассматриваемых температур (базовые кривые). При промежуточных значениях угла и температуры соответствующие зависимости (1.4) и (1.11) определяем по базовым кривым путем линейной интерполяции. Должны быть также известны коэффициенты выражений (1.13), (1.14). Тогда из уравнений (1.1) с учетом вышесказанного находим выражения для компонент деформаций образца в виде

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11} - \nu\sigma_{22}}{2G(1+\nu)} + \frac{\sigma_{11}^* - \nu\sigma_{22}^*}{2G(1+\nu)}; \quad \varepsilon_{22} = \frac{\sigma_{22} - \nu\sigma_{11}}{2G(1+\nu)} + \frac{\sigma_{22}^* - \nu\sigma_{11}^*}{2G(1+\nu)};$$

$$\varepsilon_{33} = -\frac{\nu}{1-\nu}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) - \frac{1-2\nu}{1-\nu}(e_{11}^{(n)} + e_{22}^{(n)}) + \frac{1+\nu}{1-\nu}(\varepsilon_T + \varepsilon_0^{(p)} + \varepsilon_0^{(c)}); \quad (2.1)$$

$$\left(\sigma_{11}^* = \frac{2G}{1-\nu} \left[e_{11}^{(n)} + \nu e_{22}^{(n)} + (1+\nu)(\varepsilon_T + \varepsilon_0^{(p)} + \varepsilon_0^{(c)}) \right]; \right.$$

$$\left. \sigma_{22}^* = \frac{2G}{1-\nu} \left[e_{22}^{(n)} + \nu e_{11}^{(n)} + (1+\nu)(\varepsilon_T + \varepsilon_0^{(p)} + \varepsilon_0^{(c)}) \right] \right). \quad (2.2)$$

Определение деформаций образца можно вести по такому алгоритму. Процесс нагружения образца разбиваем на ряд этапов. При этом удобно выбрать первый этап в пределах упругости материала, тогда в (2.1), (2.2) $e_{11}^{(n)} = e_{22}^{(n)} = 0$, $\varepsilon_0^{(p)} = \varepsilon_0^{(c)} = 0$ и на первом этапе значения деформаций определяются формулами теории упругости. Для определения компонент деформаций на произвольном N -м этапе по значениям напряжений вычисляем $(\sigma_0)_N = ((\sigma_{11} + \sigma_{22})/3)_N$, $(S)_N$ (1.8) и $(\omega_\sigma)_N$ (1.7). По базовым кривым (1.4) находим кривую, соответствующую $(\omega_\sigma)_N$ и температуре образца T_N . На этой кривой определяем значение $(\varepsilon_0^*)_N$, соответствующее значению $(\sigma_0)_N$, и вычисляем $(\varepsilon_0^{(p)})_N = (\varepsilon_0^*)_N - \frac{(\sigma_0)_N}{K(T_N)}$. Далее, воспользовавшись значениями $(\sigma_0)_N$, $(\omega_\sigma)_N$, T_N и формулами (1.14), (1.15) и (1.6), определяем $(\varepsilon_0^{(c)})_N$. Затем по базовым кривым (1.11) путем линейной интерполяции находим кривую, соответствующую T_N и $(\omega_\sigma)_N$, и вычисляем значение $(\Gamma^*)_N$, соответствующее $(S)_N$. Далее, учитывая (1.12), получаем $\Delta_N \Gamma^{(p)} = (\Gamma^*)_N - \frac{(S)_N}{2G(T_N)} - (\Gamma^*)_{N-1} + \frac{(S)_{N-1}}{2G(T_{N-1})}$. По известным значениям $(S)_N$, $(\omega_\sigma)_N$ и T_N с помощью формул (1.13), (1.15) определяем $\Delta_N \Gamma^{(c)}$ и находим $\Delta_N \Gamma^{(n)}$ (1.10). Далее вычисляем приращения неупругих компонент девиатора деформаций (1.9) и сами эти компоненты (1.3). Теперь вычисляем $\sigma_{11}^*, \sigma_{22}^*$ (2.2) и по формулам (2.1) определяем искомые компоненты деформаций.

§3. Результаты расчетов.

По описанному алгоритму рассчитан процесс неизотермического деформирования образца [15], данные о котором приведены в табл. 1.

Таблица 1

t , мин	T , °C	σ_{11} , МПа	σ_{22} , МПа	$\varepsilon_{11} \cdot 10^3$	$\varepsilon_{22} \cdot 10^3$	$\varepsilon_{33} \cdot 10^3$
0	590	164,1	82,6	6	-1	-4,2
1,5	606	175,3	84,3	10,1	-1	-8,1
3,3	615	187,4	87,9	14,1	-1	-11,9
4,3	633	191,4	90,3	19,2	-1	-16,8
5,5	642	200,6	93	22,2	-1	-19,5
6,7	654	211,4	97,2	26,3	0	-24,3
8	660	218,4	103,9	34,6	1	-33
9,3	674	226,8	113,1	43,9	2	-42,4
10,8	682	228,7	116,5	57,6	1	-53,7
11,1	691	228,9	118,1	65	2	-61,1

Материал образца – сплав Х18Н10Т, данные о свойствах которого приняты согласно [14, 15]. Значения базовых функций (1.4) и (1.11), вычисленных по методике [4, 5, 7, 14, 15], заданы табл. 2 и 3, соответственно.

Таблица 2

ε_0^*	$T = 500^\circ\text{C}$			$T = 700^\circ\text{C}$		
	$\omega_\sigma = 0$	$\omega_\sigma = \pi/6$	$\omega_\sigma = \pi/3$	$\omega_\sigma = 0$	$\omega_\sigma = \pi/6$	$\omega_\sigma = \pi/3$
0,0002	72	72	72	34	34	34
0,0006	166	131	88	70	60	50
0,001	178	139	100	82	68	62
0,0024	205	151	116	160	130	100
0,004	211	159	124	186	137	104
0,008	219	169	133	194	147	112
0,02	240	197	154	216	177	136

Таблица 3

Γ^*	$T = 500^\circ\text{C}$			$T = 700^\circ\text{C}$		
	$\omega_\sigma = 0$	$\omega_\sigma = \pi/6$	$\omega_\sigma = \pi/3$	$\omega_\sigma = 0$	$\omega_\sigma = \pi/6$	$\omega_\sigma = \pi/3$
0,0002	26	26	26	12	12	12
0,01	104	104	104	80	80	80
0,02	129	129	129	96	92	103
0,04	149	134	165	128	107	132
0,06	173	145	188	134	111	141
0,08	179	153	200	140	116	150
0,10	184	157	212	146	121	159
0,16	199	169	232	172	135	186

Выполнено три расчета: 1) с учетом ВНС, с использованием базовых зависимостей (1.4) и (1.11) (табл.2, 3); 2) с учетом (1.11), а вместо (1.4) принята линейная зависимость между первыми инвариантами тензоров напряжений и деформаций, т.е. с использованием упрощенного варианта определяющих уравнений [4]; 3) с использованием соотношений теории процессов деформирования по траекториям малой кривизны

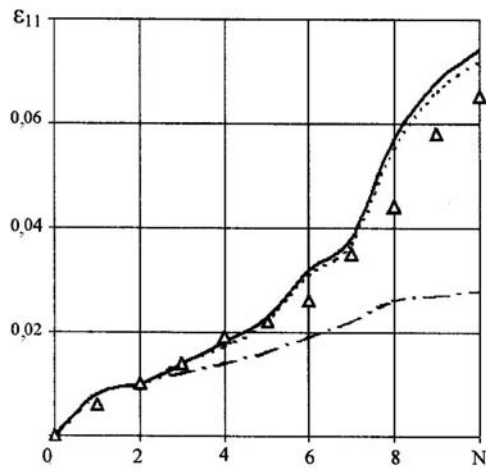


Рис. 1

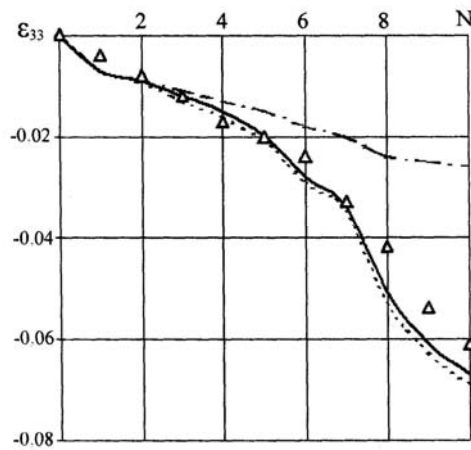


Рис. 2

[2] без учета ВНС. Для учета деформаций ползучести использованы выражения (1.13), (1.14), коэффициенты которых приведены в [15].

Результаты расчетов осевых ε_{11} и радиальных ε_{33} деформаций в зависимости от номера этапа нагружения приведены на рис. 1 и 2, соответственно. Окружные деформации ε_{22} не приведены, поскольку они малы по сравнению с ε_{11} , ε_{33} и изменяются от $-1 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^{-3}$. На рис. 1 и 2 расчетам 1), 2) и 3) соответствуют сплошные, пунктирные и штриховые линии. Экспериментальные данные на этих рисунках показаны треугольниками.

В качестве экспериментальных значений ε_{33} приняты значения, вычисленные по методике [15] с использованием условия пластической несжимаемости. Из рис. 1 и 2 видно, что результаты расчетов 1) и 2) мало различаются между собой и удовлетворительно соответствуют экспериментальным данным. Различие между результатами расчетов 1), 2) и экспериментом в области максимальных значений деформаций достигает 12%. Результаты расчета 3) на первых шести этапах, когда уровень деформаций (по абсолютной величине) не превышает 3%, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. С увеличением деформаций результаты расчета 3) все больше отличаются от экспериментальных данных и в конце рассматриваемого процесса они различаются более, чем в 2 раза.

Заключение.

Численно исследован процесс термовязкопластического деформирования трубчатого образца из материала X18H10T с помощью трех вариантов теории процессов неупругого деформирования по траекториям малой кривизны. Показано, что результаты расчета с использованием теории термовязкопластичности [15], содержащей нелинейные зависимости между первыми инвариантами тензоров напряжений и деформаций и вторыми инвариантами соответствующих девиаторов, в которых учитывается ВНС, удовлетворительно описывают полученные экспериментально значения компонент деформации. Также показано, что рассмотренный процесс деформирования может быть удовлетворительно описан более простым вариантом определяющих уравнений [4], в котором ВНС учитывается только в связи между вторыми инвариантами девиаторов напряжений и деформаций, а связь между первыми инвариантами соответствующих тензоров принята в традиционном линейном виде. Результаты расчета, полученные с использованием определяющих уравнений [2] теории процессов деформирования по траекториям малой кривизны без учета ВНС, приближенно соответствуют исследуемому процессу только в его начальных этапах при деформациях менее 3%, а в конце данного процесса, когда деформации достигают 7%, отличаются от экспериментальных данных более, чем в 2 раза.

РЕЗЮМЕ. Розглянуто доцільність застосування трьох варіантів визначальних рівнянь для описання процесів термов'язкопружнопластичного деформування ізотропних матеріалів. Показано, що рівняння термов'язкопластичності з урахуванням третього інваріанта девиатора напружень адекватно описують експериментальні дані.

1. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 324 с.
2. Шевченко Ю.Н., Бабешко М.Е., Терехов П.Г. Термовязкоупругопластические процессы сложного деформирования элементов конструкций. – К.: Наук. думка, 1992. – 328 с.
3. Altenbach H., Altenbach J., Zolochovsky A. Erweiterte Deformationsmodelle und Versagenkriterien der Werkstoffmechanik. – Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart. – 1995. – 172 S.
4. 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.
5. Babeshko M.E., Shevchenko Yu.N. Describing the Thermoelastoplastic Deformation of Compound Shells under Axisymmetric Loading with Allowance for the Third Invariant of Stress Deviator // Int. Appl. Mech. – 2010. – 46, N 12. – P. 1362 – 1371.
6. Betten J., Sklepus S., Zolochovsky A. A creep damage model for initially isotropic materials with different properties in tension and compression // Engng. Fracture Mech. – 1998. – 59. – P. 623 – 641
7. Galishin A.Z., Shevchenko Yu.N. Determining the Axisymmetric Thermoelastoplastic State of Thin Shells with Allowance for the Third Invariant of the Deviatoric Stress Tensor // Int. Appl. Mech. – 2013. – 49, N 6. – P. 675 – 684.
8. Hill R. The Mathematical Theory of Plasticity. – Oxford: Clarendon Press, 1950. – 350 p.
9. Kawai M. Constitutive modeling of creep and damage behaviors of the non-Mises type for a class of a polycrystalline metals // Int. J. Damage Mech. – 2002. – 11. – P. 223 – 246.
10. Kletchkowski T., Schomburg U., Bertram A. An endochronic viscoplastic approach for materials with different behavior in tension and compression // Mechanics of Time-dependent Materials. – 2004. – 8. – P. 119 – 135.
11. Mahnken K. Creep simulation of asymmetric effects by use of stress mode dependent weighting functions // Int. J. Solid Struct. – 2003. – 40. – P. 6189 – 6209.
12. Shevchenko A.Yu., Banyas M.V., Senchenkov I.K. A Variant of the Equations of Nonisothermal Plastic Flow // Int. Appl. Mech. – 2012. – 48, N 5. – P. 602 – 607
13. Shevchenko Yu.N., Savchenko V.G. Numerical Modeling of Process of Heat Treatment of Details with the Use of Equations of Thermoviscoplasticity // European Mech Colloq. 263. The Effect of Phase Transform. in Sol. on Constitutive Laws: Abstracts. – Vienna, 1990. – P. 16.
14. Shevchenko Yu.N., Terekhov R.G., Tormakhov N.N. Elastoplastic Deformation of Elements of an Isotropic Solid along Paths of Small Curvature: Constitutive Equations Incorporating the Stress Mode // Int. Appl. Mech. – 2007. – 43, N 6. – P. 621 – 630.
15. Shevchenko Yu.N., Tormakhov N.N. Thermoviscoplastic Deformation along Paths of Small Curvature: Constitutive Equations Including the Third Deviatoric Stress Invariant // Int. Appl. Mech. – 2012. – 48, N 6. – P. 688 – 699.
16. Zolochovsky A. Kriechen von Konstruktionselementen aus Materialien mit von der Belastung Abhängigen Charakteristiken // Technische Mechanik. – 1988. – 9. – P. 177 – 184.
17. Zolochovsky A. Creep of isotropic and anisotropic materials with different behaviour in tension and compression // In: Zyczkowski M. (Ed.), Creep in Structures. – Berlin: Springer-Verlag, 1991. – P. 217 – 220.
18. Zyczkowski M. Combined Loadings in the Theory of Plasticity. – PWN – Polish Scientific Publishers, 1981. – 714 p.

Поступила 05.06.2012

Утверждена в печать 30.09.2014