

УДК 539.3

Н. Д. Оксенчук, О. В. Доля, канд. техн. наук

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСТРУКТУРНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ТА НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПІВПРОСТОРУ ПРИ ТЕРМОМЕХАНІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

На основі чисельного моделювання розглядаються мікроструктурні перетворення та напружений стан півпростору при імпульсному термомеханічному навантаженні. Для моделювання механічної поведінки матеріалу використовується модель течії Боднера – Партома, узагальнена на випадок впливу мікроструктури на пластичні властивості сталі.

Ключові слова: мікроструктурні перетворення, модель Боднера – Партома, термомеханічне навантаження.

Вступ. Розглядаються мікроструктурні перетворення (МСП) у півпросторі, на який діє термомеханічний імпульс. При цьому враховується вплив об'ємних і пластичних характеристик окремих фаз на напружений стан матеріалу. Задача, що розв'язується, має важливе практичне значення, оскільки моделює як термічний, так і силовий фактор дії лазерного опромінення поверхні металевих тіл при їх технологічній обробці, зокрема наклепі. Інтерес до таких задач обумовлений визначенням раціональних технологічних параметрів процесів зміцнення поверхонь металевих деталей [3, 11].

Постановка задачі. Постановка термомеханічної задачі включає: співвідношення Коші (1); рівняння руху (2); рівняння теплопровідності (3); початкові умови (4); граничні умови термомеханічного навантаження (5)–(7); рівняння моделі Боднера – Партома (8)–(12):

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad \varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{u_r}{r}, \quad \varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right), \quad (1)$$

де u_r і u_z – компоненти вектора переміщень; ε_{rr} , ε_{zz} , ε_{rz} і $\varepsilon_{\varphi\varphi}$ – компоненти тензора деформації;

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} (\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}) + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} &= \rho \ddot{u}_{rr}, \\ \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \sigma_{rz} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} &= \rho \ddot{u}_{zz}, \end{aligned} \quad (2)$$

де σ_{rr} , σ_{zz} , σ_{rz} і $\sigma_{\varphi\varphi}$ – компоненти тензора напружень; ρ – густина матеріалу;

$$c_V \dot{\theta} + 3\alpha\theta K_V (\dot{\epsilon}_{kk} - 3\alpha\dot{\theta}) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - D' = r_s, \quad (3)$$

де θ – температура; α , c_V і k – коефіцієнти лінійного теплового розширення, теплоємності при сталому об'ємі і теплопровідності відповідно; K_V – модуль об'ємного стиску; $\dot{\epsilon}_{kk} = \dot{\epsilon}_{rr} + \dot{\epsilon}_{zz} + \dot{\epsilon}_{\varphi\varphi}$;

$$u_r = \dot{u}_r = 0; u_z = \dot{u}_z = 0; \quad \theta = \theta_0, t = 0, \quad (4)$$

де θ_0 – початкова температура.

Розглядається півпростір $z > 0$, $0 < r < \infty$. Як і в задачі Е. Sternberg & J. G. Chakravorty [12] припускається, що від нуля відмінна лише осьова компонента переміщення u_z , причому $u_z = u_z(z, t)$, а також $\theta = \theta(z, t)$. З цих припущень задача для півпростору еквівалентна задачі для стержня $0 < r < R$, $z > 0$, на бічній поверхні якого реалізуються умови жорсткого гладкого контакту і теплоізоляції:

$$u_r = 0, \quad \sigma_{rz} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0, \quad r = R, \quad z > 0, \quad (5)$$

з умовами (6), (7) на торці $z = 0$:

$$-k \frac{\partial \theta}{\partial z} = \begin{cases} q_0 \sin \frac{\pi}{t_p} t, & t \leq t_p, \\ 0, & t > t_p; \end{cases} \quad (6)$$

$$\sigma_{zz} = \begin{cases} -p_0 \sin \frac{\pi}{t_\sigma} t, & t \leq t_\sigma, \\ 0, & t > t_\sigma, \end{cases} \quad (7)$$

де q_0 і p_0 – задані параметри навантаження; t_p , t_σ – часові параметри навантаження – терміни дії імпульсів, між якими приймається співвідношення $t_\sigma = 2t_p$.

При термомеханічному навантаженні на тіло одночасно діють термічне і механічне навантаження, що супроводжуються взаємодією парціальних термомеханічних процесів.

Термомеханічна поведінка матеріалу описується уніфікованою моделлю течії Боднера – Партома [5, 8, 10], яка узагальнена на випадок мультифазового складу. Сутність узагальнення полягає у використанні правила сумішей для визначення параметрів моделі, що відповідають за границю течії і тимчасовий опір матеріалу.

Модель включає такі співвідношення:

- рівняння адитивності деформації

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^{\text{oph}}, \quad i, j = r, z, \varphi; \quad (8)$$

- закон Гука, записаний для девіаторної та шарової складових тензорів:

$$s_{ij} = 2G(e_{ij} - \varepsilon_{ij}^p), \quad \sigma_{kk} = 3K_v(\varepsilon_{kk} - \varepsilon_{kk}^{\text{oph}}); \quad (9)$$

- закон течії Прандтля-Рейса з умовою непружної нестисливості

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = D_0 \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(\bar{K}_0 + K)^2}{3J_2} \right]^n \right\} \frac{s_{ij}}{\sqrt{J_2}}, \quad \dot{\varepsilon}_{kk}^p = 0; \quad (10)$$

- рівняння еволюції параметра ізотропного зміцнення

$$\dot{K} = m_1(\bar{K}_1 - K)\dot{W}^p, \quad K(0) = 0, \quad (11)$$

де G – модуль зсуву; K_v – модуль об'ємного стиску; s_{ij} , e_{ij} – девіатори тензорів напружень і деформації, $s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_{kk}/3$, $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_{kk}\delta_{ij}/3$; δ_{ij} – символ Кронекера; J_2 – другий інваріант тензора напружень, $J_2 = s_{ij}s_{ij}/2$; \dot{W}^p – пластична потужність, $\dot{W}^p = \sigma_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}^p$; ε_{ij}^p , ε_{ij}^e – непружна і пружна складові деформації; $\varepsilon_{ij}^{\text{oph}}$ – термофазова деформація, яка враховує зміну об'єму матеріалу при фазових перетвореннях і визначається через питомі об'єми та концентрації фаз [7], $\varepsilon_{ij}^{\text{oph}} = \varepsilon^{\text{oph}}\delta_{ij}$; D_0 , n , \bar{K}_0 , \bar{K}_1 і m_1 – параметри моделі; по повторюваних індексах проводиться додавання.

В даній роботі параметри моделі \bar{K}_0 і \bar{K}_1 для мультифазового складу матеріалу визначаються за допомогою лінійного правила сумішей:

$$K_0 \rightarrow \bar{K}_0 = K_0^{(\xi)} y_\xi, \quad (12)$$

$$K_1 \rightarrow \bar{K}_1 = K_1^{(\xi)} y_\xi,$$

де y_ξ – об'ємні концентрації мікроструктурних фаз, $\xi = f, p, b, m$, відповідно фериту, перліту, бейніту і мартенситу; $K_1^{(\xi)}$, $K_0^{(\xi)}$ – параметри моделі для відповідних фаз.

Розрахунок концентрації фаз розпаду переохолодженого аустеніту проводиться за допомогою термодинамічної діаграми (ТКД) [4] і співвідношень для питомих об'ємів фаз [7, 9].

Метод розв'язування задачі. Задача є суттєво нелінійною. Вона розв'язується чисельно з використанням часової схеми Кренка – Нікольсона, ітераційного методу і методу скінченних елементів. У роботі використовується підхід, розвинений в статті [2].

Закон накопичення нової фази вздовж ТКД-траєкторії згідно закону Коїстінена – Марбургера апроксимується

$$p_{\xi} = \left[1 - \exp \left(-k \frac{\theta_s - \theta}{\theta_s - \theta_e} \right) \right] p_{\xi e},$$

де θ , θ_s і θ_e – поточна температура і температури початку і кінця перетворення; $p_{\xi e}$ – максимальне значення нової фази; k – деякий коефіцієнт, для якого приймається $k = 3$. Розрахунок фаз ґрунтується на припущенні, що процент нової фази визначається за формулою $p_{\xi} = p_{as} y_{\xi}$, де величина p_{as} – відсоток аустеніту при вході кривої охолодження в область фазового переходу, а y_{ξ} – поточне значення відносної фази.

У даній роботі в якості матеріалу обирається сталь 35ХМА. ТКД для цієї сталі [6] показана на рис. 1. Початковою структурою матеріалу вважається $a = 0$, $b = 0,79$, $f + p = 0,11$, $m = 0,10$.

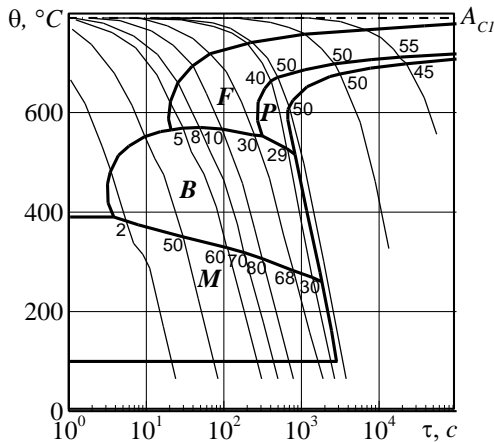


Рис. 1 – Термокінетична діаграма для сталі 35ХМА

На рис. 1 по осі абсцис відкладається відносний час $\tau = t - t_a$, де t_a – час перетину кривою охолодження температури $A_{c1} \approx 790^\circ\text{C}$ – температури початку розпаду аустеніту. Тонкими лініями показано криві охолодження, а товстими – області перетворення аустеніту відповідно у ферит (F), перліт (P), бейніт (B) і мартенсит (M). Числа на нижніх границях областей перетворення означають процентний склад набутої фази.

Параметри моделі течії для окремих фаз були визначені на основі експериментальних даних, наведених у роботах [1, 4].

Результати розрахунків. Розрахунки проводились для стержня радіусом $R = 10^{-4}$ м, довжиною $L = 5 \cdot 10^{-3}$ м. При дослідженні приймалось: $p_0 = 8$ ГПа, $q_0 = 2 \cdot 10^{11}$ кВм/м², $t_p = 1 \cdot 10^{-8}$ с, початковий крок за часом дорівнював $dt = 0,2 \cdot 10^{-10}$ с. Початкова температура стержня θ_0 дорівнює 20°C . Внаслідок швидкого охолодження відбувається лише мартенситне перетворення.

На рис. 2 показано наростання концентрації мартенситної фази при охолодженні. Розпад аустеніту в мартенсит починається при температурі $\theta = \theta_H \approx 390^\circ\text{C}$. При чому $t_m \approx 0,34 \cdot 10^{-7}$ с – час початку ефекту МСП.

В області $0 < z \leq z_m$, де $z_m = 1,27 \cdot 10^{-7}$ м (пунктирна вертикальна лінія на рис. 2), збільшується об'єм мартенситної фази в порівнянні з аустенітною. Відмітимо, що наростання концентрації мартенситу відбувається рівномірно у вказаній області, оскільки розподіл $\theta = \theta(z, t_m)$ (штрихова лінія на рис. 2) при підході до θ_H є платоподібним. Це зумовлює майже фронтальний по z залишковий розподіл $m(z)$.

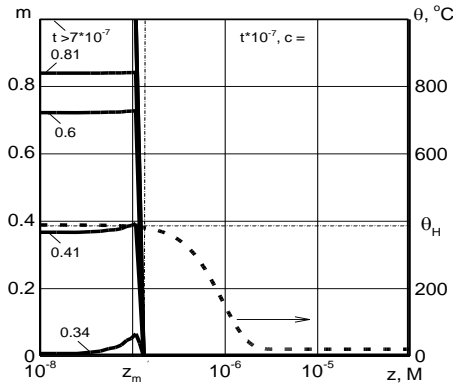


Рис. 2 – Ефект МСП

На рис. 3 показано еволюцію радіальних напружень при комбінованому навантаженні.

На рис. 3,а показано результати розрахунків із урахуванням залежності пластичних характеристик і трансформаційних змін об'єму від мікроструктурного стану (МСС); на рис. 3, б – із урахуванням лише залежності об'ємних змін від МСС; на рис. 3, в – без урахування фазових перетворень. Для зручності глибина координата z відкладена в логарифмічній шкалі. В приповерхневому шарі у момент часу $t \approx 10^{-8}$ с виникають значні стискаючі напруження $\sigma_{rr} \approx 8$ ГПа. Це зумовлено тим, що парціальні напруження термічної та механічної задачі накладаються.

Жирні лінії (рис. 3) відповідають залишковим станам, які досягаються при $t \geq 5 \cdot 10^{-7} c$. Результати на рис. 3, в (див. на жирні лінії) показують, що при неврахуванні МСП одержуємо розтягуючі радіальні (та окружні) напруження у приповерхневому шарі. Рис. 3, а та рис. 3, б демонструють, що МСП разом із термомеханічним імпульсом є фактором формування стискаючих напружень (див. на жирні лінії), внаслідок збільшення об'єму матеріалу в мартенситній фазі.

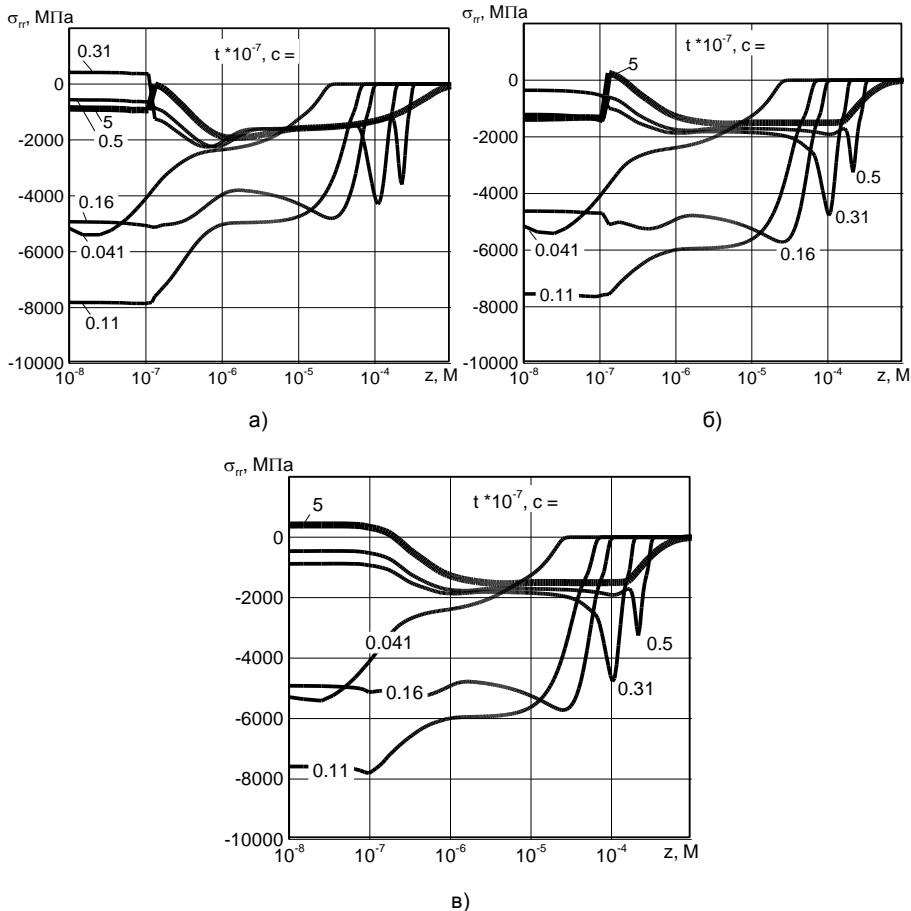


Рис. 3 – Еволюція радіальних напружень при комбінованому навантаженні

Висновок. З наведених результатів випливає, що врахування залежності лише трансформаційних змін об'єму від МСС зумовлює більший рівень стискаючих радіальних напружень, які збільшують міцність і втомну довговічність деталей конструкцій.

БІБЛІОГРАФІЧНІ ПОСИЛАННЯ

1. **Гольденблат И. И.** Расчеты на прочность, устойчивость и колебания в условиях высоких температур / И. И. Гольденблат, Н. И. Безухов, И. И. Бажанов. – М. : Машиностроение, 1965. – 568 с.
2. **Жук Я. А.** Осесимметричная динамическая связанная задача термовязкопластичности / Я. А. Жук, И. К. Сенченков, В. И. Козлов, Г. А. Табиева // Прикладная механика. – 2001. – Т. 37, № 10. – С. 83–89.
3. **Коваленко В. С.** Микро- и нанообработка сверхмощными лазерными импульсами / В. С. Коваленко // Оборудование и эксперимент для профессионалов. – 2003. – № 4. – С. 4–14.
4. **Попов А. А.** Справочник термиста. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита / А. А. Попов, А. Е. Попова. – М.–С. : ГНТИ Машиностр. лит., 1961. – 430 с.
5. **Сенченков И. К.** Термодинамически согласованные модификации обобщенных моделей термовязкопластичности / И. К. Сенченков, Я. А. Жук, Г. А. Табиева // Прикл. механика. – 1998. – Т. 34, № 4. – С. 53–60.
6. **Шоршоров М. Х.** Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке. Атлас / М. Х. Шоршоров, В. В. Белов. – М. : Наука, 1972. – 220 с.
7. **Юрьев С. Ф.** Удельные объемы фаз в мартенситном превращении аустенита / С. Ф. Юрьев. – М. : Металлургияиздат, 1950. – 48 с.
8. **Bodner S. R.** Unified Plasticity: An Engineering Approach (Final Report) Faculty of Mechanical Engineering / S. R. Bodner. – Haifa: Technion-Israel Institute of Technology. – 2000. – 106 p.
9. **Leblond J. B.** A theoretical and numerical approach to the plastic behavior of steel during phase transformation. – I. Derivation of general relations / J. B. Leblond, G. Mottet, J. C. Devaux // J. Mech. Phys. Solids. – 1986. – 34, № 4. – P. 395–409.
10. **Moreno V.** Prediction of material thermomechanical response with a unified viscoplastic constitutive model V. Moreno, E. H. Jordan // Int. J. of Plast. – 1986. – Vol. 2. – P. 223–245.
11. **Qin Y.** Temperature-stress fields and related phenomena induced by a high current pulsed electron beam / Y. Qin, J. Zou, C. Dong, et-al // Nuclear Instrum. & Meth. In Phys. Research. Part B. – 2004. – Vol. 225. – P. 544–554.
12. **Sternberg E.** On inertial effects in a transient thermoelastic problem / E. Sternberg, J. G. Chakravorty // ASME. J. Appl. Mech. – 1959. – Vol. 26, № 4. – P. 503–509.

Н. Д. Оксенчук, Е. В. Доля, канд. техн. наук

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛУПРОСТРАНСТВА ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

На основании численного моделирования рассматриваются микроструктурные превращения и напряженное состояние полупространства при импульсном термомеханическом нагружении. Для моделирования механического поведения материала используется модель течения Боднера – Партома, обобщенная на случай влияния микроструктуры на пластические свойства стали.

Ключевые слова: микроструктурные превращения, модель Боднера – Партома, термомеханическое нагружение.

NUMERICAL INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURAL TRANSFORMATIONS AND STRESS STATE OF A HALF-SPACE UNDER THERMOMECHANICAL LOADING

Stress state and micro structural transformations of a half-space under thermo-mechanical loading are considered by using a numerical simulation. To model of the mechanical behavior of material the Bodner-Partom model, generalized for the case of microstructure influence on plastic properties of steel, is used.

Keywords: *micro-structural transformations, model Bodner-Partom, thermo-mechanical loading.*

Micro-structural transformations (MST) in a half-space under the thermo-mechanical loading are considered. An influence of volumetric and plastic characteristics of each phase on stress state of the material is taken into account.

The problem models the thermal and power factors of laser irradiation onto a surface of metal bodies during their technological processing. A finding of rational technological parameters of hardening process of metal parts surfaces causes the interest in such problems [2, 3].

Nonlinear behavior of the material is described by Bodner-Partom unified flow model generalized for the case of multiphase material state [1, 4]. The generalization is to use the rule of mixtures to determine the model parameters.

The formulation a dynamical axis-symmetrical coupled thermo-mechanical problem includes: Cauchy kinematic equations; motion equations; heat equation; mechanical and thermal boundary conditions and appropriate initial conditions [6].

The problem is solved numerically by the time step integration method, iterative method and FEM. The algorithm for solving the problem is presented in [6].

Phase concentrations as a product of breakup of super cooled austenite are calculated with using of thermo-kinetic diagram (TKD) together with Koistinen-Marburger law. Relations for specific volumes and concentrations of separate phases are used to determine the transformational volume deformation.

Calculation of phases based on assumption that percentage of a new phase is given by $p_{\xi} = P_{as} y_{\xi}$, where value P_{as} is austenite percentage during cooling curve inlet in the phase transition region, and y_{ξ} is current value of relative phase.

Parameters of flow model for individual phases were identified on the basis of experimental data [4].

Linear law of mixture is utilized to determine the flow model parameters for current phase composition.

Calculations were performed for the following parameters: $R = 10^{-4} m$, $L = 5 \cdot 10^{-3} m$, $p_0 = 8 GPa$, $q_0 = 2 \cdot 10^{11} \kappa W/m^2$, $t_q = 1 \cdot 10^{-8} s$, where p_0 and q_0 are the peak pulse values of pressure and thermal flux; t_q is the pulse duration.

The temperature was varied in $20^{\circ}C \div 1300^{\circ}C$. As a material was steel 35CrMoA.

The results of calculations with taking into account the influence of phase composition on inelastic properties of the material, and of the thermo-transformation strain, are shown in fig. 1. The results of the calculations without

MST are shown in fig. 2. Bold lines in fig. 1 and fig. 2 correspond to residual states that are reached at $t \geq 5 \cdot 10^{-7} s$.

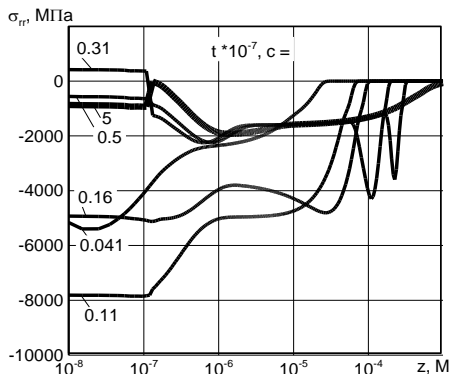


Fig. 1

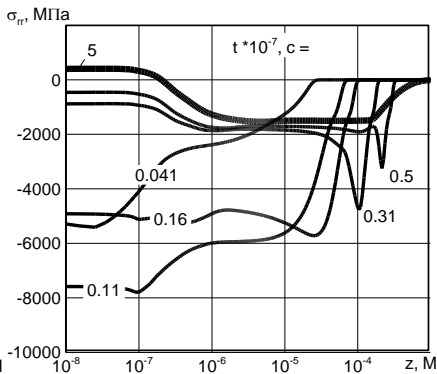


Fig. 2

From these results it follows that taking into account the dependence of transformational change in the volume during MST causes greater levels of compressive radial stresses that increase strength and fatigue life of parts of structures.

REFERENCES

1. **Moreno V.** Prediction of material thermomechanical response with a unified viscoplastic constitutive model / V. Moreno, E. H. Jordan // *Int. J. of Plast.* – 1986. – Vol. 2. – P. 223–245.
2. **Qin Y.** Temperature-stress fields and related phenomena induced by a high current pulsed electron beam / Y. Qin, J. Zou, C. Dong, et-al // *Nuclear Instrum. & Meth. In Phys. Research. Part B.* – 2004. – V. 225. P. 544–554.
3. **Rubio-Gonzales C.** Effect of laser shock processing an fatigue crack growth and fracture toughness of 6061-T6 aluminum alloy/ C. Rubio-Gonzales, J. L. Osana, G. Gomes-Rosas // *Mater. Sci. & Engng.* – 2004. – Vol. 386, №3. – P. 291–295.
4. **Senchenkov I. K.** Modeling of a nonisothermal flow with regard for the dependence of plastic properties on the microstructure of a material / I. K. Senchenkov, N. D. Oksenchuk // *J. Math. Sci.* – 2013. – Vol. 190, N. 6. – P. 796–803 (in Russian).
5. **Yilbas B. S.** Laser pulse heating and flexural wave generation during treatment of metallic surfaces / B. S. Yilbas // *J. Materials Processing Techn.* – 2003. – Vol. 141. – P. 1–8.
6. **Zhuk Ya. A.** Influence of microstructural transformations on stress-strains state of locally irradiated steel disk / Ya. A. Zhuk., I. K. Senchenkov, L. Ya. Vasilyeva // *Mat. Methody ta Fyzyko-Mechanichni Polya.* – 2011. – Vol. 54, №1. – P. 101–115 (in Ukrainian).

*Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка
НАН України,
Київ, Україна
Київський національний університет
будівництва та архітектури,
Київ, Україна*

Надійшла до редколегії 01.03.2013