

УДК 539.3

*И. К. Сенченков, д-р физ.-мат. наук, О. П. Червинко, канд. физ.-мат. наук,
И. А. Рябцев, д-р техн. наук*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО И МИКРОСТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЙ ВАЛКА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ В ПРОЦЕССЕ МНОГОСЛОЙНОЙ НАПЛАВКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Разработана методика расчета остаточных наплавочных и последующих эксплуатационных напряжений в валке горячей прокатки. Рассчитаны амплитудные и средние характеристики напряженно деформированного состояния, необходимые для оценки усталостной долговечности деталей.

Ключевые слова: прокатные валки, многослойная наплавка, остаточные напряжения и микроструктура, долговечность наплавленных деталей.

Введение. При оценке долговечности наплавленных валков горячей прокатки, роликов машин непрерывного литья заготовок, штампов горячего деформирования металла определяющую роль играют два фактора: 1) остаточные наплавочные напряжения и деформации; 2) характеристики напряженно-деформированного состояния при эксплуатационном циклическом термомеханическом нагружении. Исследованию остаточного НДС наплавленных деталей посвящены работы [4–6]. Обобщение результатов расчета эксплуатационных напряжений проведено в монографии [1], причем в большинстве работ не учитывалось влияние остаточных напряжений на долговечность деталей.

В настоящей работе в рамках сквозной расчетной схемы рассматривается история жизни валка горячей прокатки, включающая технологическую стадию многослойной наплавки рабочей поверхности и последующую эксплуатационную стадию, которая моделируется вращающейся термомеханической нагрузкой.

Объект исследования. Схема процесса наплавки и эксплуатации. Расчеты проводились для валка горячей прокатки НКМЗ из стали 50ХФА, наплаваемого подслоем низкоуглеродистой стали 08кп и наружным слоем мартенситной стали 25Х5ФМС. Конечно-элементное разбиение бочки валка показана на рис. 1. Диаметр бочки валка 1445 мм.

После наплавления валок подвергался эксплуатационному нагружению в условиях термомеханического цикла. Предполагается, что валок подпирается жестким опорным валком и не испытывает деформаций изгиба (рис. 2).

Методика расчета. Задача о наплавлении и последующем циклическом нагружении валка является трехмерной (3D-задача). На настоящем этапе такая постановка не может быть эффективной для практических расчетов.

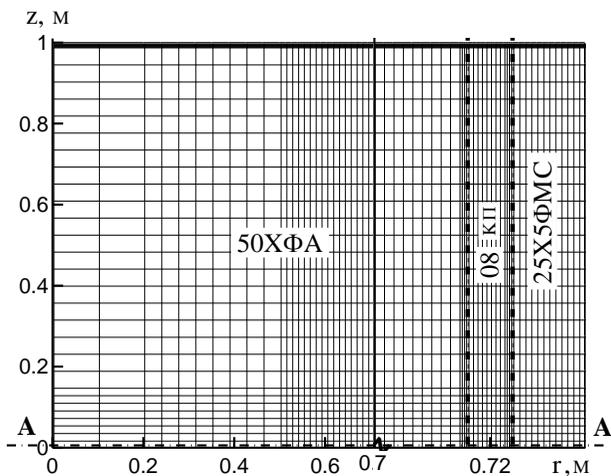


Рис. 1 – Конечно-элементная разбивка бочки вала



Рис. 2 – Схема прокатки

Учитывая двухстадийный характер процесса – наплавка и эксплуатация, а также осевую протяженность геометрии вала, предлагается следующий подход к решению задачи.

1. Стадия наплавки моделируется в рамках осесимметричной постановки задачи.

2. Стадия эксплуатации, характерная высоко локализованными контактными температурно-механическими нагрузками, описывается в рамках задачи о плоской деформации для осевого сечения цилиндра.

При этом постановка задачи для стадии 2 учитывает остаточные деформации, сформированные на стадии наплавки. Такая постановка отличается от классической задачи о плоской деформации, в которой остаточные деформации отсутствуют.

Постановка задачи о наплавке. Задача решается в цилиндрической системе координат $orz\varphi$ и включает:

– уравнения равновесия (1)

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r}(\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}) + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r}\sigma_{rz} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0; \quad (1)$$

– теплопроводности (2)

$$c_v \dot{\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\lambda r \frac{\partial \theta}{\partial r}) - \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z}) + Q; \quad (2)$$

где c_v и λ – коэффициенты объемной теплоемкости и теплопроводности;

– кинематические уравнения, уравнения модели течения Боднера–Партома [2], а также начальные (3) и граничные условия (4), (5) на поверхностях бочки:

$$\theta = \theta_0, t = 0; \quad (3)$$

$$\sigma_{rr} = \sigma_{rz} = 0, \quad -k \frac{\partial \theta}{\partial r} = -q + \alpha(\theta - \theta_c) + cc_0(T^4 - T_c^4),$$

$$r = R, R+h, 0 < z < L, t \neq t_{1,2}^*; \quad (4)$$

$$\sigma_{rr} = \sigma_{rz} = 0, \quad \pm k \frac{\partial \theta}{\partial r} = -q + \alpha(\theta - \theta_c) + c\tilde{n}_0(T^4 - T_c^4),$$

$$z = 0, r = R, R+\tilde{h}, t > 0, \quad (5)$$

где $\tilde{h} = h_1, h_1 + h_2$; $h_{1,2}$ – толщины первого и второго наплавляемого слоев;

$t_{1,2}^*$ – время наложения наплавляемых слоев; $T = \theta + 273$; \tilde{n}_0 – постоянная Больцмана; \tilde{n} – коэффициент черноты; α – коэффициент теплоотдачи; θ_c – температура окружающей среды; q – поток, передаваемый дугой.

Для удовлетворения условий отсутствия напряжений в наращиваемых слоях закон Гука для девиаторных и шаровых составляющих тензоров напряжений и деформации записывается в виде [3]

$$s_{ij} = 2G(e_{ij} - e_{ij}^p - e_{ij}^*), \quad \sigma_{kk} = 3K_V(\varepsilon_{kk} - \varepsilon_{kk}^{ph} - \varepsilon_{kk}^*), \quad (6)$$

где G и K – сдвиговой и объемный модули; ε_{ij}^* – компоненты тензора собственных деформаций.

Эти компоненты рассчитываются в процессе решения задачи из условия отсутствия напряжений в поверхностных слоях в момент их наращивания.

Постановка задачи о термомеханическом эксплуатационном нагружении валка. Задача формулируется в рамках обобщенной плоской деформации для сечения AA (рис. 1) с учетом остаточных деформаций. Условия нагружения отвечают схеме работы валка, показанной на рис. 3.

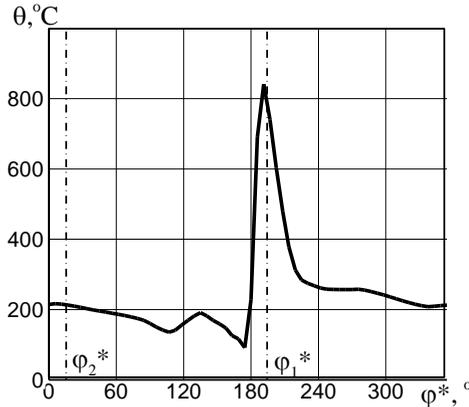


Рис. 3 – Распределение контактной температуры по ободу валка

В полярной системе координат r, φ граничные условия для напряжений и температуры принимаются в виде

$$\sigma_{rr} = \sigma(\varphi^*), \sigma_{rz}(\varphi^*) = 0, \theta = \theta(\varphi^*), 0 < \varphi^* < 2\pi. \quad (7)$$

Здесь $\varphi^* = \varphi - \omega t$, функция $\sigma(\varphi^*)$ отвечает распределению нормально-го напряжения в задаче Герца о гладком штампе и задается в виде

$$\sigma(\varphi^*) = \sigma_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\varphi^* - \varphi_{1,2}^*}{\varphi_0^*} \right)^2} \quad \text{при} \quad \left| \varphi^* - \varphi_{1,2}^* \right| < \varphi_0^*,$$

$$\sigma(\varphi^*) = 0 \quad \text{при} \quad \left| \varphi^* - \varphi_{1,2}^* \right| > \varphi_0^*, \quad (8)$$

где $2\varphi_0^*$ – область действия нагрузки (контакта). Значения φ_1^* и φ_2^* отвечают центральным точкам областей контакта валка с горячей полосой и опорным валком (рис. 3).

Расчет остаточных напряжений в наплавленном валке. Упрощенная схема мгновенной наплавки по слоям реализовывалась для следующего режима. Поверхность бочки валка в течение 2,8 с разогревалась до 1800°C , после чего на нее наплавлялся первый слой наплавки (подслой) из стали 08кп толщиной $h_1 = 5\text{ мм}$ температуры 1800°C . После остывания детали до

300 °С ее поверхность снова за 2,6 с разогревалась до 1800 °С, после чего накладывался второй слой наплавки толщиной $h_2 = 8 \text{ мм}$ из стали 23Х2НВФА. Затем деталь остывала до комнатной температуры 20 °С.

Радиальные распределения в валке концентраций фаз распада аустенита при охлаждении и остаточных напряжений и интенсивности пластических деформаций e_i^P показаны на рис. 4.

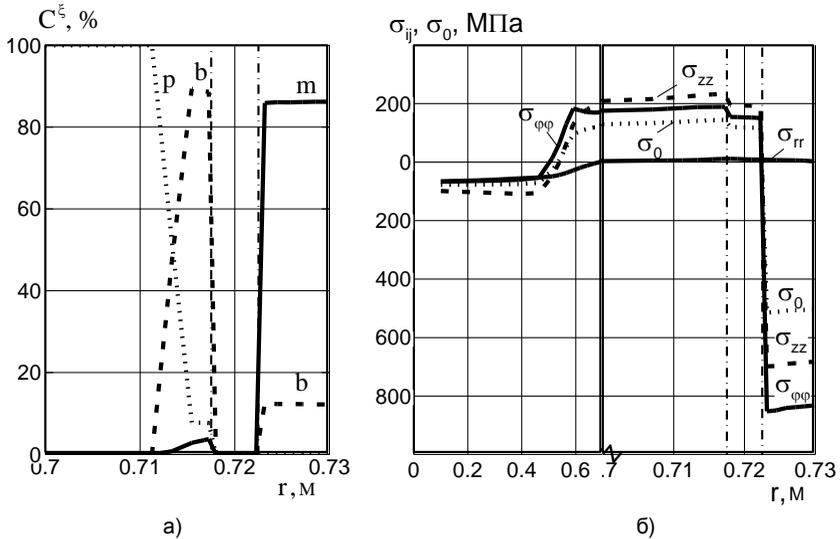


Рис. 4 – Радиальные распределения концентраций фаз и остаточных напряжений в валке

Здесь приняты следующие обозначения: C^ξ – объемные доли p – перлита, b – бейнита, m – мартенсита; s_i – интенсивность девиатора тензора напряжений, $s_i = (1/2 s_{ij} s_{ij})^{1/2}$, $e_i^P = (1/2 e_{ij}^P e_{ij}^P)^{1/2}$. Штрих-пунктирными линиями показаны границы наплавленных слоев и основного материала. Концентрации фаз распада аустенита рассчитывались на основе термокинетических диаграмм и закона Коистинена–Марбургера.

Из рис. 4, а видно, что наращённый наружный слой имеет преимущественно мартенситную структуру; в основном металле в зоне термического влияния – бейнит-перлитная структура. Мартенсит за счет большего удельного объема формирует в наружном слое сжимающие напряжения σ_{zz} и $\sigma_{\phi\phi}$ (рис. 4, б). В основном металле их уравнивают растягивающие значения компонент.

Эксплуатационное нагружение. Выводы. На рис. 5 приведены циклы главных напряжений σ_1 , σ_3 и температуры θ в наружной точке наплавленного цилиндра при $\omega = 0,69c^{-1}$ и $p_0 = 300MPa$. Кинетика деформационного процесса в наружной точке показана на рис. 6.

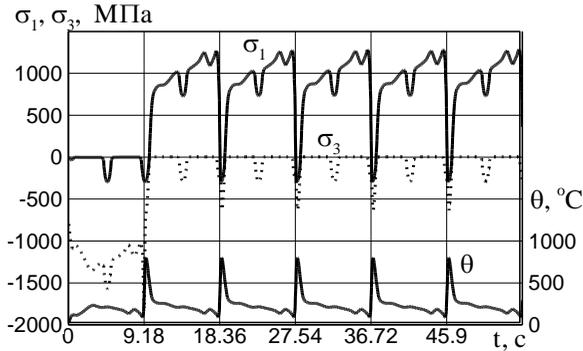


Рис. 5 – Эксплуатационные циклы главных напряжений и температуры в наружной точке наплавленного вала

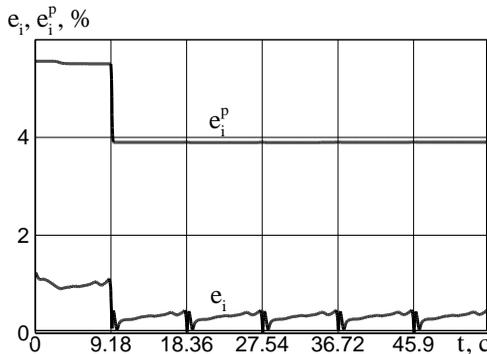


Рис. 6 – Эксплуатационные циклы интенсивностей полной и пластической деформаций в наружной точке наплавленного вала

Приведены кривые для интенсивности деформаций $e_i = (1/2e_{ij}e_{ij})^{1/2}$ и интенсивности пластических деформаций e_i^p . Для поверхностных точек имеем: $\sigma_1 = \sigma_{\varphi\varphi}$, $\sigma_3 = \sigma_{rr}$. После выхода точки из зоны нагрева от контакта с горячей полосой, вследствие резкого охлаждения, в поверхностном слое формируются значительные растягивающие напряжения. В результате в этом слое неупругая остаточная деформация снижается. Начальная стадия термомеханического нагружения оказывает существенное влияние на всю

последующую историю эксплуатации вала. На этой стадии формируется его пластическое состояние.

Для оценки усталостной долговечности вводятся амплитудные (индекс a), средние (индекс m) и усредненные (индекс s) характеристики полевых величин:

$$\sigma_{1a} = (\max_T \sigma_1(t) - \min_T \sigma_1(t)) / 2, \quad \sigma_{1m} = (\max_T \sigma_1(t) + \min_T \sigma_1(t)) / 2;$$

$$\sigma_{1s} = \frac{1}{T} \int_0^T \sigma_1 dt, \quad T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Очевидно, что средние значения механических величин определяются наложением остаточного напряженного состояния и средними значениями величин, обусловленными циклической термической и механической нагрузками.

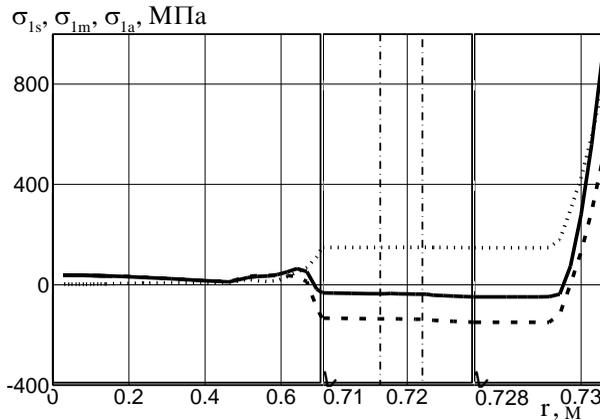


Рис. 7 – Радиальные распределения амплитудной, средней и усредненной характеристик главного напряжения σ_1 в наружной точке наплавленного вала

Для оценки многоциклового усталости на рис. 7 приведены радиальные распределения характеристик σ_{1a} (пунктирная линия), σ_{1m} (штриховая линия) и σ_{1s} (сплошная линия). В поверхностном слое реализуется экстремальный режим нагружения вследствие быстрого охлаждения после выхода из зоны контакта с горячей полосой. В результате численного анализа установлено, что циклические неупругие деформации возникают при $p_0 = p_0^* \approx 1000 \text{ МПа}$. Следовательно, при $p_0 > p_0^*$ происходит смена механизма многоциклового усталости на малоцикловую. При этом значение p_0^* в значительной мере определяется скоростью вращения вала и режимом его охлаждения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Домбровский Ф. С.** Работоспособность наплавленных роликов машин непрерывного литья заготовок / Ф. С. Домбровский, Л. К. Лещинский – К.: Изд-во ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 1995. – 225 с.
2. **Сенченков И. К.** Определение параметров модели Боднера–Партома термовязко-пластического деформирования материалов / И. К. Сенченков, Г. А. Табиева // Прикл. механика. – 1996. – 32, № 2. – С. 64–72.
3. **Сенченков И. К.** Термомеханическая модель растущих цилиндрических тел из физически нелинейных материалов // Прикл. механика. – 2005. – 41, № 9. – С. 118–126.
4. **Radaj D.** Welding residual stresses and distorsion. Calculation and measurment. – Dusseldorf. DVs Verlag GmbH, 2003. – 396 p
5. **Senchenkov I. K.** A method for calculating the heat resistance of deposited metal / [I. K. Senchenkov, O. P. Chervinko, I. A. Ryabtsev, I. A. Kondratiev] // Welding Intern. – 2012. – Vol. 25. – № 12. – P. 952–956.
6. **Senchenkov I. K.** Modeling of residual stresses developed in steel cylinders subjected to surface-layer deposition by welding / [I. K. Senchenkov, Y. A. Zhuk, O. P. Chervinko, E. Turyk] // J. Eng. Math. – 61. – P. 271–284.

*I. K. Senchenkov, д-р фіз.-мат. наук, О. П. Червінко, канд. фіз.-мат. наук,
I. A. Рябцев, д-р техн. наук*

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО І МІКРОСТРУКТУРНОГО СТАНУ ВАЛКА ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ В ПРОЦЕСІ БАГАТОШАРОВОЇ НАПЛАВКИ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Розроблена методика розрахунку залишкових наплавочних і наступних експлуатаційних напружень у валку гарячої прокатки. Розраховані амплітудні і середні характеристики напружено-деформованого стану, необхідні для оцінки втомної довговічності деталей.

Ключові слова: прокатні валки, багат шарова наплавка, залишкові напруження і мікроструктура, довговічність наплавлених деталей.

*I. K. Senchenkov, Professor, O. P. Chervinko, Associate Professor,
I. A. Ryabtsev, Professor*

NUMERICAL MODELING OF STRESS-STRAIN STATE AND OF MICROSTRUCTURE STATE IN HOT ROLLING ROLL AT MULTILAYER SURFACING AND OPERATIONAL PROCESS

The method of calculation of residual surface and following operation stresses in hot rolling roll is developed. Amplitude and mean values of stress-strain state, that are necessary for evaluation of fatigue endurance of parts, are calculated.

Keywords: rolling roll, multilayer surfacing, residual stresses and microstructure, endurance of surfacing parts.

Numerical simulation method of surfacing process of working surfaces (of rolls, stamps) at hot deforming of metal is developed [1]. Two major aspects of endurance of such details – residual stress-strain state and operational cyclic stress-strain state – are taking into account.

The problem statement and numerical technique are presented in [2, 3, 5, 6]. In these papers the life time of the roll for hot rolling, including the multilayer sur-

facing stage as well as working stage of cyclic thermo-mechanical loading, are considered.

The roll of 50CrVA steel, surfaced with underlying 08kp steel and outer 25Cr5VMoSi martensite steel, is presented in fig. 1. The configuration of loading system is shown in fig. 2. The governing equations system [2–6] consists of equilibrium equations, heat conduction equation, Bodner-Partom flow model and Hook elastic equations completed by appropriate boundary and initial conditions.

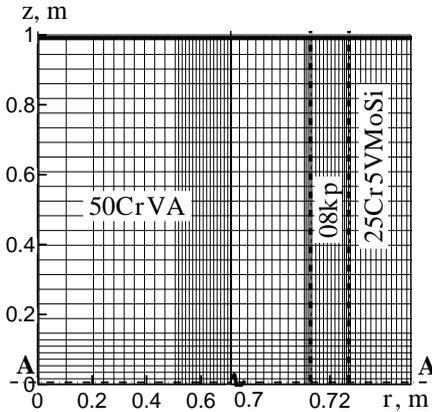


Fig. 1

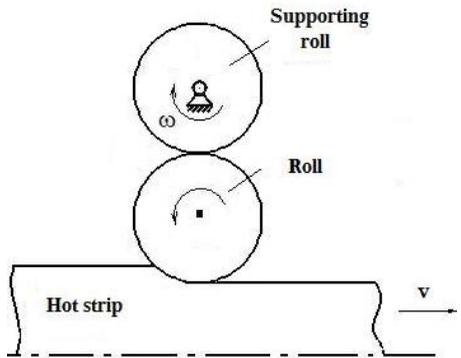


Fig. 2

The surface temperature dependence on rotation angle φ is shown in fig. 3.

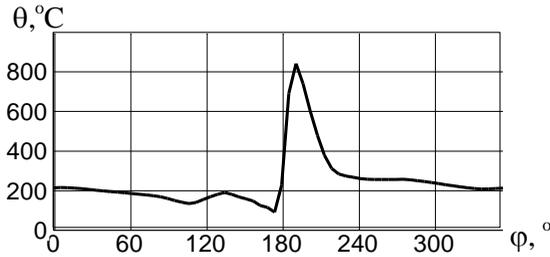


Fig. 3

The problem is solved with time step implicit technique, iterative method and method of finite elements.

The results of simulation of residual state are shown in fig. 4 a, fig. 4 b, where in fig. 4a letters p, b, m denote distribution of perlite, bainite, martensite phase correspondingly.

In fig. 5 cyclic temperature and the main stresses distribution in working cycle are presented.

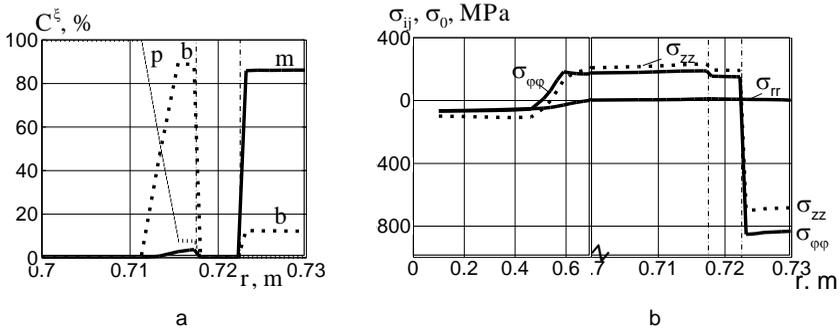


Fig. 4

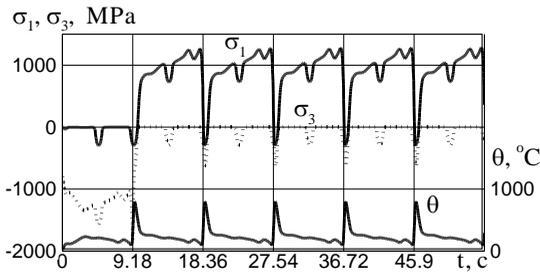


Fig. 5

These results give possibility to calculate the amplitude and mean value of mechanical characteristics to evaluate roll durability on the base of appropriate criteria of fatigue strength.

REFERENCES

1. **Dobrovski F. S.** Energy surfaced roll of the machines of continuous casting / F. S. Dobrovskij, L. K. Leshchinski // Publishing house E. O. Paton IEW of National Academy of Sciences of Ukraine, 1995. – 225 p. (in Russian).
2. **Senchenkov I. K.** Definition of model Bodner-Partom parameter thermoviscoplastic deformation of material / I. K. Senchenkov, G. A. Tabieva // Appl. mech. – 1996. – 32, № 2. – P. 64–72 (in Russian).
3. **Senchenkov I. K.** Thermomechanical model of growing cylindrical bodies of physically nonlinear materials / I. K. Senchenkov // Appl. mech. – 2005. – Vol. 41, № 9. – P. 118–126 (in Russian).
4. **Radaj D.** Welding residual stresses and distorsion. Calculation and measurement // D. Radaj / DVs Verlag GmbH. – 2003. – 396 p
5. **Senchenkov I. K.** A method for calculating the heat resistance of deposited metal / I. K. Senchenkov, O. P. Chervinko, I. A. Ryabtsev, I. A. Kondratiev // Welding Intern. – 2012. – Vol. 25, № 12. – P. 952–956.
6. **Senchenkov I. K.** Modeling of residual stresses developed in steel cylinders subjected to surface-layer deposition by welding / I. K. Senchenkov, Y. A. Zhuk, O. P. Chervinko, E. Turyk // J. Eng. Math. – 61. – P. 271–284.

Институт механики
им. С. П. Тимошенко НАН Украины,
Киев, Украина

Поступила в редколлегию 10.02.2013