

УДК 621.914.025.7:621.914.1

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.06

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВИЗНАЧАЛЬНОГО РІВНЯННЯ ПЛАСТИЧНИХ СТАЛЕЙ ШЛЯХОМ ДОСЛІДЖЕННЯ НА СТИСКАННЯ**С. С. НЕКРАСОВ¹, А. Ю. ДОВГОПОЛОВ^{1*}, Д. О. ЖИГИЛІЙ², А. В. БАРАНЕНКО¹, Ю. Є. СИДОРОВ¹**¹ кафедра технології машинобудування, верстати та інструменти, Сумський державний університет, Суми, УКРАЇНА² кафедра загальної механіки і динаміки машин, Сумський державний університет, Суми, УКРАЇНА

*e-mail: d_a_y_@ukr.net

АНОТАЦІЯ У статті проаналізовано вплив коефіцієнта тертя на процес деформації циліндричного зразка з пластичних сталей при стисканні. Розглянута методика дозволяє визначити залежність дійсних напружень від дійсних деформацій з випробувань на стискання. Встановлено, що причиною бочкоподібності зразка, що стискається, з пластичної сталі є виключно тертя між поверхнями випробовуваного зразка й опор. Для зменшення впливу тертя на показники діаграми напруження-деформації, стандартна методика пропонує використати різні прийоми його зниження, це можуть бути спеціальні мастила або зміна форми опорних поверхонь зразка. Але усі ці підходи неможливо використати при визначенні діаграми напруження-деформації при температурах більше 300 °С, оскільки використання мастил стає неможливим. Для визначення впливу коефіцієнта тертя на форму зразка, що стискається, авторами запропоновано провести модельний експеримент процесу стискання пластичної сталі з різними коефіцієнтами тертя за рівних умов. Такий підхід дозволив визначити вплив коефіцієнта тертя і порівняти результати з натурним експериментом. Отримана діаграма стискання пластичної сталі з натурного експерименту дозволяє визначити залежність істинних напружень від істинних деформацій, її використання дає можливість визначити коефіцієнти визначального рівняння моделі матеріалу, необхідного для проведення модельних експериментів пластичної деформації сталей, як при кімнатних температурах так і при температурах до 900 °С з урахуванням впливу пластичних деформацій. Запропонована методика дозволяє отримувати залежність істинних напружень від істинних деформацій, а також враховує зміну коефіцієнта тертя між торцями зразка і опорами при дії підвищених температур, чого не враховують стандартні методики проведення випробувань. У роботі показано, що початковими даними для отримання залежності істинних напружень від істинних деформацій є різниця діаметрів зразка і діаграма сила-переміщення.

Ключові слова: деформація; метод скінчених елементів; пластичні сталі; дійсні напруження; моделювання; стискання

DEVELOPMENT OF CONSTITUTIVE EQUATIONS IDENTIFYING METHODOLOGY FOR STEELS FOR PLASTIC MOULDING BY COMPRESSION TESTING**S. NEKRASOV¹, A. DOVHOPOLOV¹, D. ZHYHYLIY², A. BARANENKO¹, YU. SYDOROV**¹ Department of Mechanical engineering technology, Machines and Tools, Sumy State University, Sumy, UKRAINE² Department of General Mechanics and Dynamics of Machines, Sumy State University, Sumy, UKRAINE

ABSTRACT The influence of frictional coefficient on the cylindrical plastic steel specimen under compression is analyzed. The considered methodology allows determining effective stress dependence on effective strains by compression testing. It is found that the reason for the barrel-shaped plastic steel compressive test specimen form is only friction between contact surfaces of tested specimens and supports. The standard methodology suggests using various friction reduction technologies to reduce the friction effect on stress-strain diagram determination. These can be special lubricants or changes in the shape of the specimen bearing surfaces. But all approaches to the issue with stress-strain diagram determination are unable to be implemented under temperatures above 300°C due to not being able to use lubricants. The plastic steel compression process experiment behind the model with varying only friction coefficients is suggested in order to determine the effect of friction coefficient on the shape of a compressed specimen. This approach makes it possible to search into the effect of friction coefficient and compare the results with a full-scale experiment. The plastic steel compression diagram, having been obtained from a full-scale experiment, permits to determine effective stress-strain relationship, which, in turn, allows calculating the constitutive equation coefficients of the material model necessary for carrying out simulations of plastic steels deformation under both room indoor temperature and temperatures up to 900°C, including the plastic deformation influence. The proposed methodology also provides the possibility to obtain an effective stress-strain relationship and varying the friction coefficient between the specimen end surface and the supports being exposed to elevated temperatures, which cannot be treated by standard test methods. It is shown that the initial data for obtaining the effective stress-strain relationship are the difference in specimen diameters and the force-displacement diagram.

Keywords: strain state; finite element method; plastic steels; effective stress; simulation; compression

Вступ

Теорія визначальних рівнянь вперше з'явилася у роботах із механіки деформованого твердого тіла.

Разом з тим спроби їх формулювання робилися неодноразово та називалися по-різному: фізичні рівняння або рівняння стану. Так, у теорії пружності використовується визначальні рівняння пружних

лінійних та нелінійних матеріалів, а у механіці суцільних середовищ – рівняння стискальної та нестискальної рідини, в'язкої лінійної та нелінійної рідин. Теорія пластичності оперує рівняннями пластичних матеріалів, і теплопровідності – відповідно. Разом, застосування комбінованої системи таких рівнянь на базі спільної їхньої основи й обґрунтування меж і докладності застосування для прикладних технічних задач важкого машинобудування є актуальним викликом сьогодення. У роботі викладається єдина теорія визначальних рівнянь у складі методики ідентифікації визначальних рівнянь ливарних сталей із дослідів на стискання.

Визначальні параметри вибираються за загальною схемою робіт [1–3] на основі механіки «термомеханічного процесу» в околі матеріальної точки. Він ґрунтується на історії зміни всіх визначальних параметрів за часом у кожній типовій матеріальній точці. Вважається, що поведінка деформованого тіла визначається усім термомеханічним процесом. Така залежність задається визначальними рівняннями матеріалу. Наближене розв'язання полягає в апріорному формулюванні системи визначальних рівнянь і в подальшій експериментальній і чисельно-експериментальній перевірці їхньої відповідності одержаних експериментальним результатам.

Так, конвенційні методи дослідження металічних матеріалів на стискання [4] вимушено доповнювалися обмеженнями на швидкість деформацій та температуру. Тоді як специфічні вимагають нагрівання зразка до постійної температури і утримання її рівномірною, докладання осьової сили за ретельно контрольованою швидкістю деформації.

Для прийнятних випробувань на стискання обов'язково потрібно, щоб зразки не згиналися до досягнення руйнування. З цієї причини обладнання та методика випробувань, повинні ретельно забезпечувати рівномірне навантаження та осьове центрування [5]. Через цей ефект, деякі методи тестування включають обмеження за дозволеним відхиленням. Вводяться інтервали перевірки вирівнювання, зазначені в методах, що цього вимагають. Деякі типи випробувань можуть вказувати на поточний стан вирівнювання випробувальної рамки з кожним випробуванням зразком. Якщо метод випробування вимагає перевірки вирівнювань, частота їх перевірки повинна враховувати всі дані, тобто часовий інтервал, зміні рамки випробувань та, за можливості, поточні показники стану вирівнювання за результатами випробувань.

Найбільш критичною є вимога до мащення поверхонь зразків, що контактують [5]. Їх змащують за допомогою опорного пристрою з метою зменшення тертя. Інакше одновісний напружено-деформований стан стискання буде спотворено дотичними напруженнями на поверхнях дотикання, що призведе

до систематичної похибки у результатах експерименту. Ще мастило повинно мати незначну реакцію з поверхнею зразка для вибраної температури й особливо часу випробування, тобто повинно зберігати свої змащувальні властивості протягом усього експерименту. Найбільш розповсюджені дисульфід молібдену та графітні мастила. Проте обмеження за максимальною температурою для заданих мастил є істотним: до +450°C для дисульфиду молібдену [6] та до +400°C для промислових графітних мастил [7], тоді як різання відбувається за значно вищих температур.

Тому набуває актуальності пошук альтернативних методів визначення діаграми стискання [8], основаних на дослідженні контактної взаємодії оброблюваного та обробляючого тіл за умов дії високих температур.

Мета роботи

Розробка методики ідентифікації визначального рівняння пластичних сталей із дослідів на стискання, шляхом моделювання методом скінчених елементів у програмному пакеті LS-DYNA.

Викладення основного матеріалу

При стисканні у випробовуваному зразку виникає складний напружено-деформований стан в результаті того, що коефіцієнт тертя між торцями зразка і опорами не дорівнює нулю. Якщо припустити, що коефіцієнт тертя на поверхнях контакту зразка з опорами дорівнює нулю, то у такому разі, циліндричний зразок при стискуванні так і залишався б циліндричним. Насправді ж при осіданні циліндричного зразка він стає бочкоподібним, що пояснюється наявністю тертя на торцях зразка.

Така форма дослідного зразка, призводить до нерівномірного розподілу напружень уздовж його осі при стисканні. Оскільки за цією методикою неможливо безпосередньо отримати залежність істинних напружень від істинних деформацій випробовуваного матеріалу, то для отримання цієї залежності по діаграмі стискання розроблена і прийнята наступна методика.

Ідея запропонованої методики полягає в тому, що результати натурного експерименту зіставляються із результатами моделювання виконаного методом скінчених елементів. Випробування зразків проводяться в аналогічних умовах з різними коефіцієнтами тертя, а за формою зразка судять про коефіцієнт тертя, який мав місце на торцях зразка. Для опису процесів, що відбуваються при стисканні зразка, проводиться моделювання процесу стискання стандартного циліндричного зразка типу III що відповідає ГОСТ 25.503-97 методом скінчених елементів. Цей тип зразка застосовується для визначення фізичної межі текучості, умовної межі

текучості і побудови кривої зміцнення до значень логарифмічних деформацій. Завдання вирішувалося в 2d-осесиметричній постановці (рис. 1) в програмному пакеті LS - DYNA.

Математичне формулювання моделі буде наступним: система, яка моделюється, в роботі прийнята у вигляді двох об'єктів (заготовки або її частини та інструменту або його частини), певним чином орієнтованих у просторі один відносно іншого і такими що взаємодіють один з одним. Ці об'єкти здійснюють відносні рухи з відповідними швидкостями руху. Об'єкти взаємодіють між собою по контактних поверхнях, створюючи один в одному деформації за рахунок дії контактних сил, обумовлених заданою моделлю тертя на відповідних ділянках контактних поверхонь. Кожен об'єкт чинить опір деформації, внаслідок чого виникають внутрішні сили (напруження), що відповідають заданій моделі матеріалу об'єкту. Разом із цим, якщо міцність об'єкту недостатня, то відбувається його руйнування. Критерій і схема руйнування задаються моделлю цього процесу. Вплив температури на деформації відбувається шляхом зміни механічних властивостей оброблюваного матеріалу і трибологічних властивостей на контактній поверхні інструменту. Виходячи з того, що пружні деформації заготовки, що виникають внаслідок лінійного температурного розширення малі, то в моделі вони не враховуються.

1. Диференційовані рівняння руху:

$$\rho \ddot{u}_i = f_i + \sigma_{ij,j}, \quad i=1,2,3, \quad j=1,2,3. \quad (1)$$

2. Результуюча сила: $f = f_{load} + f_{contact} - I$.

3. Зв'язок прискорень зі швидкостями переміщень і переміщеннями:

$$\dot{u}_i = \int \ddot{u}_i d\tau; \quad u_i = \int \dot{u}_i d\tau. \quad (2)$$

4. Зв'язок швидкостей деформацій із швидкостями переміщень:

$$\varepsilon_u = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

5. Рівняння нерозривності:

$$\rho = \rho_0 \det(F). \quad (4)$$

6. Зв'язок приросту повних деформацій зі швидкостями деформацій:

$$d\varepsilon_i = \dot{\varepsilon}_i d\tau \quad (5)$$

7. Зв'язок приросту повних деформацій з приростами пластичних пружних деформацій:

$$d\varepsilon_i = d\varepsilon_i^e + d\varepsilon_i^p. \quad (6)$$

8. Рівняння зв'язку напружень з деформаціями:

$$p = K(1/\det(F)-1); \quad s_{ij} = C^e (\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^p). \quad (7)$$

9. Умова пластичності з урахуванням визначального рівняння:

$$\Phi = \bar{\sigma} - \sigma_s(\bar{\varepsilon}^p, \dot{\bar{\varepsilon}}^p, T) = 0 \quad (8)$$

$$\sigma_s(\bar{\varepsilon}^p, \dot{\bar{\varepsilon}}^p, T) = (A + B(\bar{\varepsilon}^p)^n) \left(1 + C \ln(\dot{\bar{\varepsilon}}^p / \dot{\bar{\varepsilon}}_0^p) \right) (1 - T^{*m}) \quad (9)$$

10. Умова навантаження-розвантаження Куна-Такера:

$$\dot{\lambda} \geq 0, \quad \Phi \leq 0, \quad \dot{\lambda} \Phi = 0, \quad \dot{\lambda}_{,j} = \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}}. \quad (10)$$

11. Зв'язок компонентів напружень і деформацій:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}}; \quad \sigma_{ij} = s_{ij} - \frac{1}{3} tr(p) \delta_{ij}, \quad \dot{\bar{\varepsilon}} = \sqrt{\dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p}, \quad (11)$$

$$\bar{\varepsilon}^p = \int \dot{\bar{\varepsilon}}^p d\tau.$$

12. Умова руйнування: (фізичний критерій),

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\varepsilon}^p}{\bar{\varepsilon}_f^p(p/\sigma_s, \dot{\bar{\varepsilon}}^p, T)} \geq 1$$

$$\bar{\varepsilon}_f^p = (D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)) (1 + D_4 \ln \dot{\bar{\varepsilon}}) (1 + D_5 T^*), \quad (12)$$

$$\sigma^* = p/\sigma_s, \quad T^* = (T - T_0)/(T_{\infty} - T_0).$$

13. Рівняння теплопровідності:

$$\rho C_m \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_{T,i} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \eta \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \quad (13)$$

або рівняння адіабатичного розриву:

$$\dot{T} = \eta \frac{\sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p}{\rho C_m}, \quad \text{якщо} \quad (14)$$

$$\frac{\lambda_{T,i}}{\rho C_m} \frac{h K_L}{V} (1 - \alpha) \leq 0.5 L_c^2 - \int_0^L r \operatorname{erf} \left(\frac{r}{2\sqrt{\omega \tau}} \right) dr$$

В наведених рівняннях прийняти такі умовні позначення: τ - час; T - температура; F - градієнт руху; u_i - вектор переміщення; x_i - вектор координат; σ_{ij} - тензор напружень; s_{ij} - девіатор напружень; ρ - густина; p - гідростатичний тиск (позитивне при стисканні); C^e - тензор пружних коефіцієнтів; ε_{ij} - тензор деформацій; f_{load} - інтенсивність зовнішніх сил; $f_{contact}$ - інтенсивність сил на контактній межі тіла; f_i - інтенсивність об'ємних сил; I - інтенсивність внутрішніх сил; h - розмір зони первинних деформацій; K_L - коефіцієнт скорочення стружки; V - швидкість різання; η - доля механічної роботи, яка перетворюється в теплоту; параметри матеріалів: ρ_0 - початкова густина; λ_T - теплопровідність; C_m - масова теплоємність.

Початкові умови задаються наступним чином: $\tau = 0; \quad \forall M \in I \cup 3 \quad x_i^0 = x_i^0(M); \quad \sigma_{ij}^0(M) = 0;$

$$\rho_0 = \rho_0(M); \quad \varepsilon_{ij}^0(M) = 0; \quad \bar{\varepsilon}^p = 0, \quad T_0(M) = T_c.$$

Граничні умови: на внутрішніх границях заготовки $\Sigma_{3\infty} \quad \forall M \in \Sigma_{3\infty} \quad u_i(M) = 0, \quad T(M) = T_c$ та інструменту $\Sigma_{I\infty} \quad \forall M \in \Sigma_{I\infty} \quad \dot{u}_z(M) = V_z$

$u_z(M) = V_z, \quad T(M) = T_c,$ на вільних границях заготовки $\Sigma_{3_віль}$ та інструмента $\Sigma_{I_віль}:$

$$\forall M \in \Sigma_{3_вил} \cup \Sigma_{I_вил} \quad \sigma_{ij}|_M \cdot n_i = 0,$$

$-\lambda_T \left(\frac{dT}{dn} \right)_M = \alpha_T (T - T_c)$, де α_T – коефіцієнт тепловіддачі.

На контактній поверхні Σ_{3I} , яка є геометрично загальною частиною поверхні заготовки Σ_3 та інструменту Σ_I , т.е. $\Sigma_{3I} \in \Sigma_I \cap \Sigma_3$: $\forall M \in \Sigma_{3I}$

$$\dot{g} = (\dot{u}_i)_{\Sigma_3} n_i - (\dot{u}_i)_{\Sigma_I} n_i, \quad \sigma_n \leq 0; \quad \dot{g} \geq 0; \quad \sigma_n \cdot \dot{g} = 0;$$

$$\frac{q_{\Sigma_3}}{q_{\Sigma_I}} = \frac{\sqrt{\lambda_3 c_3 \rho_3}}{\sqrt{\lambda_I c_I \rho_I}}; \quad q_M R^* = T_{\Sigma_3} - T_{\Sigma_I}; \quad q_M = \tau_n V_c - (q_{\Sigma_3} + q_{\Sigma_I}),$$

де σ_n – контактні нормальні напруження,

$$V_c = \left| \dot{u}_i|_{\Sigma_I} - \dot{u}_i|_{\Sigma_3} \right| \quad \text{дотичні напруження}$$

τ_n – відповідно моделі М. S. Shaw [7]:

$$\tau_i = \tau_a + \tau_d, \quad \tau_d = \mu_d \sigma_n,$$

$$\tau_a = \tau_0 + (\beta_0 - k_b \cdot \max(0; T - T_k)) \cdot \sigma_{nr}, \quad (15)$$

умова охвачування:

$$\begin{cases} V_c = 0, \text{ якщо } |\tau_n| < \tau_{\max} - \text{охватування на контактній границі - внутрішнє тертя,} \\ V_c > 0, \text{ якщо } |\tau_n| = \tau_{\max} - \text{ковзання на контактній границі - зовнішнє тертя,} \end{cases}$$

де τ_{\max} – максимальні дотичні напруження опору ковзанню в заданій точці різальної кромки на контактній поверхні, на границі між зонами $\Sigma_v \in M$ і ковзання $\Sigma_r \in M$ $\sigma_{ij}|_{\Sigma_v} = \sigma_{ij}|_{\Sigma_r}$; $\dot{u}_i|_{\Sigma_v} = \dot{u}_i|_{\Sigma_r}$ в зоні схоплювання $\forall G \in \Sigma_v, \dot{u}_i|_{\Sigma_v} = \dot{u}_i|_{\Sigma_r}$.

Для моделювання стискання зразка створювалися геометричні образи циліндричних опор і циліндричного зразка. Одна з опор жорстко закріплена, а інша переміщується з постійною швидкістю у напрямку закріпленої опори. Зразок і опори розбивалися на 4 вузлові елементи. На поверхнях контакту задавався середній коефіцієнт тертя. Граничні умови реалізовані умовою осьової симетрії, шляхом обмеження переміщень і обертань на осі X=0 [9].

Опори розглядалися як абсолютно жорсткі тіла. Для вирішення контактної задачі мають бути додатково задані їх модуль пружності E , коефіцієнт Пуассона μ і густина ρ . Оскільки застосовувалися твердосплавні опори, то вказані властивості прийняті рівними: $E = 560 \text{ МПа}$, $\mu = 0.3$, $\rho = 14600 \text{ кг/м}^3$. Модель матеріалу зразка задавалася у формі Джонса-Кука з тими коефіцієнтами, які необхідно було визначити.

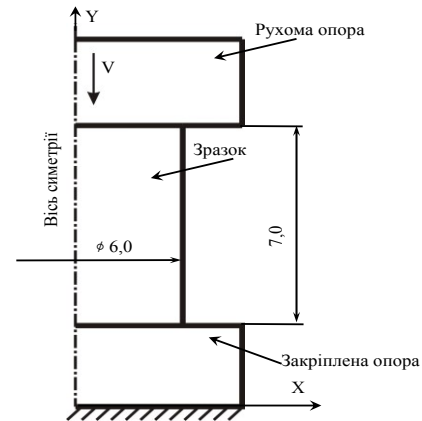


Рис. 1 – Розрахункова схема дослідження на стискання

Завдання формулювалося таким чином: з віртуального експерименту на стискання зразка за методикою, що відповідає ГОСТ 25.503-97, необхідно отримати залежність істинних напружень σ_u від істинних деформацій ε для умов, близьких до умов, в яких знаходиться матеріал при різанні. Оскільки деформації залежать від висоти зразка після стискання, то при дослідженні визначалися залежності:

$$\varepsilon = f(d_\phi) \quad (16)$$

$$\sigma = f(d_\phi) \quad (17)$$

де d_ϕ – максимальний (фактичний) діаметр зразка уздовж його осі після стискання (див. рис. 2, б).

У свою чергу фактичний діаметр зразка залежить від номінального діаметру зразка d_n , як якості якого прийнятий діаметр зразка після стискання при середньому коефіцієнті тертя на торцях зразка $\mu_{cp} = 0$.

Номінальний діаметр зразка що визначається з умови постійності об'єму з рівняння:

$$d_n = d_0 \sqrt{\frac{h_0}{h_i}} \quad (18)$$

де h_0 – початкова висота зразка; h_i – висота зразку в даний момент часу; d_0 – початковий діаметр зразка.

Для отримання залежності фактичного діаметру від номінального, виконано моделювання процесу стискання стандартних зразків з різними середніми коефіцієнтами тертя на торцях зразка, для чого при проведенні віртуальних випробувань вимірюється максимальний діаметр зразка d_ϕ через певні проміжки часу.

З віртуального експерименту на стискання було встановлено, що середній коефіцієнт тертя на торцях зразка, що стискається, робить вплив на максимальний діаметр бочки, який у свою чергу залежить від міри пластичної деформації зразка (рис. 2).

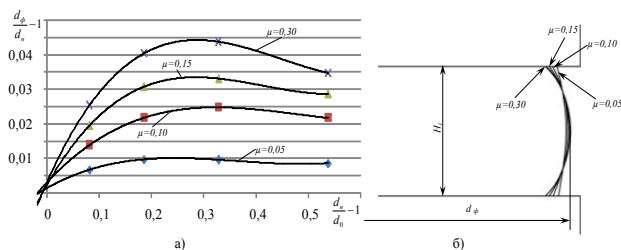


Рис. 2 – Вплив номінального діаметру d_n зразка, що стискається, на його фактичний діаметру d_f при різних коефіцієнтах тертя μ (а) і вплив коефіцієнта тертя на форму бічної поверхні стиснутого зразка (б)

По визначених, за прийнятою методикою даним, методом найменших квадратів отримана залежність:

$$\frac{\Delta R_i}{h_i} = 0,0683 \varepsilon_p^{0,83} \left(1 - e^{-26,7 \mu^{1,53}}\right) \quad (19)$$

де $\Delta R_i = \left(\frac{d_f - d_{ном}}{2}\right)$;

$\varepsilon_p = -\ln \frac{h_i}{h_0}$ – ступінь пластичної деформації зразку в даний момент часу.

Із співвідношень (18) можна отримати значення середнього коефіцієнту тертя на торцях зразка:

$$\mu = \left(\frac{\ln \left(1 - \frac{\Delta R}{h} \varepsilon_p^{-0,83} \right)}{-26,7} \right)^{\frac{1}{1,53}} \quad (20)$$

Висновки

Отримана залежність впливу коефіцієнта тертя між опорами і випробовуваним зразком у експериментах на стискання з проведених віртуальних експериментів, що дозволило визначити залежність істинних напружень від істинних деформацій як при кімнатних температурах так і при температурах до 900 °С.

Список літератури

1. Трусделл К. *Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред*. Москва: Изд-во Мир, 1975. 592 с.
2. Пальмов В. А. *Колебания упруго-пластических тел*. Москва: Изд-во Наука, 1976. 328 с.
3. Пальмов В. А. *Теория определяющих уравнений в нелинейной термомеханике деформируемых тел*. Учебное пособие. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2008. 113 с.
4. ASTM E9-19, Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
5. ASTM E209-18, Standard Practice for Compression Tests of Metallic Materials at Elevated Temperatures with

- Conventional or Rapid Heating Rates and Strain Rates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
6. Song, I., Park C., Choi H. C. Synthesis and properties of molybdenum disulphide: from bulk to atomic layers. *RSC Adv.* 2015. № 5. P. 7495 – 7514. doi: 10.1039/C4RA11852A.
7. Zhang Z. J., Simionesie D., Schaschke, C. Graphite and Hybrid Nanomaterials as Lubricant Additives. *Lubricants.* 2014. № 2. P 44 – 65. doi:10.3390/lubricants2020044.
8. Romero V., Black A., Orient G., Antoun B. Propagating Stress-Strain Curve Variability in Multi-Material Problems: Temperature-Dependent Material Tests to Plasticity Models to Structural Failure Predictions. *In Engineering Failure Analysis.* 2019. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.90357.
9. Довгополов А. Ю., Некрасов С. С., Жигилій Д. О. Моделювання напружено-деформованого стану роз'ємного з'єднання в деталях з армованих композиційних матеріалів методом СЕА. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях : зб. наук. пр. Харків : НТУ «ХПИ». 2019. № 5 (1330). С. 10-17. doi:10.20998/2413-4295.2019.05.02.*

References (transliterated)

1. Trusdell K. *Pervonachal'nyj kurs racional'noj mekhaniki sploshnyh sred [An initial course in rational continuum mechanics]*. Moscow, Edition Mir, 1975. 592 p.
2. Pal'mov V. A. *Kolebaniya uprugoplasticheskih tel [Vibrations of elastic-plastic bodies]*. Moscow, Edition Nauka, 1976. 328 p.
3. Pal'mov V. A. *Teoriya opredelyayushchih uravnenij v nelinejnoj termomekhanike deformiruemym tel [The theory of constitutive equations in nonlinear thermomechanics of deformable bodies]*. SPb: Edition SPbGPU, 2008. 113 p.
4. ASTM E9-19, Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
5. ASTM E209-18, Standard Practice for Compression Tests of Metallic Materials at Elevated Temperatures with Conventional or Rapid Heating Rates and Strain Rates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
6. Song I., Park C., Choi H. C. Synthesis and properties of molybdenum disulphide: from bulk to atomic layers. *RSC Adv.* 2015, Vol. 5, pp. 7495 – 7514, doi: 10.1039/C4RA11852A.
7. Zhang Z. J., Simionesie D., Schaschke, C. Graphite and Hybrid Nanomaterials as Lubricant Additives. *Lubricants.* 2014, Vol. 2, pp. 44 – 65, doi: 10.3390/lubricants2020044.
8. Romero V., Black A., Orient G., Antoun B. Propagating Stress-Strain Curve Variability in Multi-Material Problems: Temperature-Dependent Material Tests to Plasticity Models to Structural Failure Predictions. *In Engineering Failure Analysis.* IntechOpen, 2019, doi: 10.5772/intechopen.90357.
9. Dovgopolov A., Nekrasov S., Zhyhylii D. Strain-stress states simulation of detachable joint for reinforced composites by FEM. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 5 (1330), pp. 10–16, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.02.

Відомості про авторів (About authors)

Некрасов Сергій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Сумський державний університет, доцент кафедри технологія машинобудування, верстати та інструменти, м. Суми, Україна; e-mail: nekrasovss@gmail.com

Sergii Nekrasov – Candidate of Technical Sciences, Docent, Sumy State University, associate professor at the Department of Mechanical engineering technology, Machines and Tools, Sumy, Ukraine; e-mail: nekrasovss@gmail.com

Довгополов Андрій Юрійович – кандидат технічних наук, Сумський державний університет, викладач кафедри технології машинобудування, верстати та інструменти, м. Суми, Україна; e-mail: d_a_y_@ukr.net

Andrii Dovhopolov – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Sumy State University, lecturer at the Department of Mechanical engineering technology, Machines and Tools, Sumy, Ukraine; e-mail: d_a_y_@ukr.net

Жигилій Дмитро Олексійович – кандидат технічних наук, Сумський державний університет, старший викладач кафедри загальної механіки та динаміки машин, м. Суми, Україна, e-mail: zhigiliy.d@gmail.com

Dmytro Zhyhylii – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Lecturer at the Department of General Mechanics and Dynamics of Machines, Sumy, Ukraine; e-mail: zhigiliy.d@gmail.com

Бараненко Андрій Володимирович – Сумський державний університет, магістрант кафедри технологія машинобудування верстати та інструменти, м. Суми, Україна.

Andrii Baranenko – Sumy State University, undergraduate at the Department of Mechanical engineering technology, Machines and Tools, Sumy, Ukraine.

Сидоров Юрій Євгенійович – Сумський державний університет, магістрант кафедри технологія машинобудування верстати та інструменти, м. Суми, Україна;

Yurii Sydorov – Sumy State University, undergraduate at the Department of Mechanical engineering technology, Machines and Tools, Sumy, Ukraine.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Некрасов С. С., Довгополов А. Ю., Жигилій Д. О., Бараненко А. В., Сидоров Ю. Є. Розробка методики ідентифікації визначального рівняння пластичних сталей шляхом дослідження на стискання. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 40-45. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.06.

Please cite this article as:

Nekrasov S., Dovhopolov A., Zhyhylii D., Baranenko A., Sydorov Yu. Development of constitutive equations identifying methodology for steels for plastic moulding by compression testing. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 40-45, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.06.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Некрасов С. С., Довгополов А. Ю., Жигилій Д. А., Бараненко А. В., Сидоров Ю. Є. Разработка методики идентификации определяющего уравнения пластичных сталей путем исследования на сжатие. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 40-45. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.06.

АННОТАЦІЯ В статті виконан аналіз впливу коефіцієнта трия на процес деформування циліндричного образця із пластичних сталей при сжатті. Розглянута методика дозволяє визначити залежність істинних напружень від істинних деформацій із випробувань на сжатті. Установлено, що причиною бочкообразности сжимаемого образца из пластичной стали является исключительно трение между поверхностями испытуемого образца и опор. Для уменьшения влияния трения на определение диаграммы напряжения-деформации, стандартная методика предлагает использовать различные приемы снижения трения, это могут быть специальные смазки или изменение формы опорных поверхностей образца. Но все эти подходы невозможно использовать при определении диаграммы напряжения-деформации при температурах более 300 °С, поскольку использование смазок становится невозможным. Для определения влияния коэффициента трения на форму сжимаемого образца, авторами предложено провести модельный эксперимент процесса сжатия пластичной стали с различными коэффициентами трения при прочих равных условиях. Такой подход позволил определить влияние коэффициента трения и сравнить результаты с натурным экспериментом. Полученная диаграмма сжатия пластичной стали из натурального эксперимента позволяет определить зависимость истинных напряжений от истинных деформаций, используя которую становится возможным рассчитать коэффициенты определяющего уравнения модели материала, необходимого для проведения модельных экспериментов пластического деформирования сталей как при комнатных температурах так и при температурах до 900 °С с учетом влияния пластических деформаций. Предложенная методика так же позволяет получать зависимость истинных напряжений от истинных деформаций и изменение коэффициента трения между торцами образца и опорами при воздействии повышенных температур, чего не позволяют учитывать стандартные методики проведения испытаний. Показано, что исходными данными для получения зависимости истинных напряжений от истинных деформаций являются разница диаметров образца и диаграмма сила-перемещение.

Ключевые слова: деформация; метод конечных элементов; пластичные стали; истинные напряжения; моделирование; сжатие

Надійшла (received) 01.12.2020