

УДК 539.376

<https://doi.org/10.17721/1812-5409.2021/4.10>

Романов О. В., к.т.н., с.н.с.

O. V. Romanov, Ph.D.

Щодо впливу напруженого стану на деформування конструкційних матеріалів

On the influence of the stress state on the deformation of construction materials

Національна академія наук України, Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка, 303057, м. Київ, вул. Несторова, 3
e-mail: creep@inmech.kiev.ua

National Academy of Sciences of Ukraine, S.P.Timoshenko Institute of Mechanics, 03057, Kyiv, Nesterov str., 3,
e-mail: creep@inmech.kiev.ua

Розглядається питання впливу виду напруженого стану (ВНС) на процес склерономного і реономного деформування конструкційних матеріалів при простих і близьких до простих режимах навантаження. Вказуються параметри, що характеризують ВНС. Це параметр (показник) жорсткості напруженого стану, що відбиває вплив першого інваріанта тензора напружень і являє собою з точністю до постійного множника відношення гідростатичного компонента тензора напружень до його девіаторної складової. Вплив третього інваріанта тензорів напружень враховується рядом параметрів – параметром Надаї-Лодє, а також кутом ВНС у його різних трактуваннях. Показано варіант врахування цього впливу шляхом введення в визначальні рівняння функції з параметром кута ВНС. Ця функція визначається на основі аналізу базових експериментів на розтяг і кручення. Показано, що врахування ВНС підвищує точність розрахунку і поліпшує узгодження результатів розрахунку з експериментом.

Ключові слова: вид напруженого стану; параметр (показник) жорсткості напруженого стану; кут виду напруженого стану.

The question of the influence of the type of stress state (TSS) on the process of scleronomic and rheonomic deformation of structural materials under simple and close to simple loading conditions is considered. The parameters characterizing the TSS are indicated. This is a parameter (indicator) of the rigidity of the stress state, which reflects the influence of the first invariant of the stress tensor and is, with an accuracy of a constant factor, the ratio of the hydrostatic component of the stress tensor to its deviator component. The influence of the third invariant of stress tensors is taken into account by a number of parameters – the Nadai-Lode parameter, as well as the TSS angle in its various interpretations. A variant of taking this influence into account by introducing the governing equation of state of the function with the parameter of the TSS angle is shown. This function is determined based on analysis of basic tensile and torsion experiments. It is shown that taking into account VNS increases the accuracy of the calculation and improves the agreement between the calculation results and experiment.

Key words: type of stress state; parameter (indicator) of the rigidity of the stress state; angle of stress state view.

Статтю представив член-кореспондент НАН України Жук Я.О.

Вступ

На процес деформування матеріалу елементів конструкцій в умовах експлуатації серед інших факторів впливає також вид напруженого стану (ВНС). ВНС визначається через інваріанти тензора напружень, у якості яких зазвичай використовують перший інваріант тензора напружень або його кульовий компонент, а також другий і третій інваріанти девіатора напружень, причому,

як правило, у неявному вигляді через безрозмірні нормовані функції, що відображають вид, а не рівень напруженого стану.

Постановка задачі. Параметри ВНС

Розглядається процес деформування ізотропних конструкційних матеріалів в умовах складного напруженого стану з урахуванням ВНС при

простих [1] і близьких до простих режимах навантаження

$$\sigma_{ij}(\tau) = k(\tau)\sigma_{ij}(\tau_0); \quad k(\tau_0 = 0) = 1; \quad \tau \in (0, t), \quad (1)$$

де σ_{ij} – компоненти тензора напружень; $k(\tau)$ – функція, що задає режим навантаження.

Процес деформування в цих умовах здійснюється по прямолінійній траєкторії або траєкторії малої кривизни. У цьому випадку як міру накопиченої деформації можна розглядати не параметр Одквіста, а інтенсивність деформації ε_i , залежність якої від інваріантів тензора напружень у загальному випадку буде виглядати так

$$\varepsilon_i(t) = f[J_1(T_\sigma(t)), J_2(D_\sigma(t)), J_3(D_\sigma(t))], \quad (2)$$

а його граничне значення ε_i^* можна розглядати як розташований запас пластичності матеріалу – Δ_p [2]. В (2) $J_1(D_\sigma(t))$ – перший інваріант тензора напружень, $J_2(D_\sigma(t))$, $J_3(D_\sigma(t))$ – відповідно другий і третій інваріанти девіатора напружень.

Очевидно, що параметри, що відбивають вплив інваріантів (2) на процес деформування, й будуть характеризувати ВНС.

Вплив інтенсивності напружень як функції $J_2(D_\sigma)$ на процес деформування досить добре досліджено для різних класів матеріалів і тому в даній роботі не розглядається.

Вплив першого інваріанта тензорів напружень $J_1(T_\sigma)$ або його гідростатичного компонента σ_0 на процес накопичення деформації здійснюється за допомогою параметра (показника) жорсткості напруженого стану P_g

[2], що представляє собою в загальному виді відношення гідростатичного компонента тензора напружень Γ до його девіаторної складової D

$$P_g = \Gamma/D. \quad (3)$$

Вплив третього інваріанта девіатора напружень $J_3(D_\sigma)$ на ВНС здійснюється рядом *допоміжних* параметрів. Це параметр Надаї-Лоде, а також допоміжний кут у його різних трактуваннях і позначений терміном кут ВНС.

Вплив ВНС на процеси склерономного і реономного деформування

У випадку склерономного (короткочасного активного) деформування вплив жорсткості напруженого стану представляється у вигляді діаграм пластичності – залежності граничної величини деформації на момент руйнування ε_i^* або, як було відзначено раніше, – розташованого запасу пластичності $\Delta_p = \varepsilon_i^*$ від жорсткості напруженого стану $P_g = \sigma_0/\sigma_i$, представленого на рис. 1.

З рис.1 видно, що зі збільшенням P_g у всьому діапазоні його змін, спостерігається стійка тенденція до скрихнення матеріалу. Причому в інтервалі $-\infty < P_g < 0$ діаграм пластичності добре апроксимуються поліноміальними залежностями, а в діапазоні $0 < P_g < +\infty$ – експонентними.

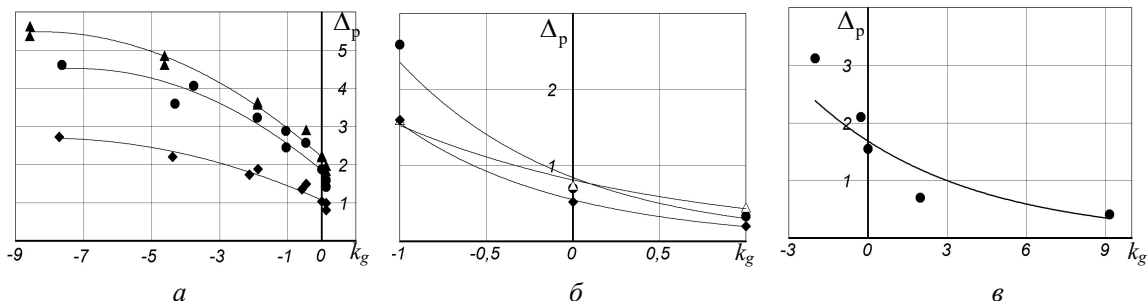


Рис. 1. Діаграми пластичності: а) [3] – сталь 10КП (▲), сталь 20 КП (●), сталь 38ХГНМ (◆); б) [4] – сталь 10 (●), сталь ЭИ-961 (Δ), сталь 35 (◆); в) [2] – вуглецева сталь (●)

На підставі представлених матеріалів і робіт інших авторів можна зробити висновок, що $P_g > 0$ відіграє роль свого роду каталізатора

процесу розпушення матеріалу, в той час $P_g < 0$ робить гальмуючу дію на процес розпушення, підвищуючи при цьому його пластичність.

Як показують експериментальні дослідження, додатковий гідростатичний тиск сповільнює швидкість повзучості матеріалів, однак це твердження справедливо тільки для великого зовнішнього тиску.

Вплив третього інваріанту девіатора напружень враховується за допомогою функції кута виду напруженого стану $\gamma(\psi_\sigma)$, в якій параметр кута виду напруженого стану ψ_σ розглядається у вигляді

$$\psi_\sigma = \frac{1}{3} \arccos \frac{27J_3(D_\sigma)}{2\sigma_i^3}. \quad (4)$$

В (4) прийнято σ_i – інтенсивність нормальних напружень; ψ_σ – кут виду напруженого стану, графічна інтерпретація якого (рис. 2) показує

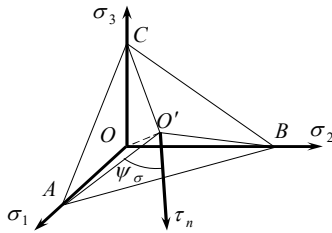


Рис. 2. Графічна інтерпретація кута ВНС

орієнтацію октаедричного дотичного напруження τ_n в октаедричній площині ABC відносно проєкції AO' на цю площину осі максимального головного напруження σ_1 .

У цій інтерпретації одновісному розтягу відповідає $\psi_\sigma = 0$, одновісному стиску $\psi_\sigma = \pi/3$, а чистому крученню $\psi_\sigma = \pi/6$.

Залежність між девіаторами деформацій і напружень має вигляд

$$e_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon_i[\sigma_i(t), t, \gamma(\psi_\sigma)]}{\sigma_i(t)} s_{ij}(t). \quad (5)$$

Визначення залежностей функції $\gamma(\psi_\sigma)$ від ψ_σ здійснюється на основі базових дослідів на одновісний розтяг $\bar{\varepsilon}_i(\sigma_i = \text{const}, t)$ та чисте скручення $\tilde{\varepsilon}_i(\sigma_i = \text{const}, t)$ за формулою

$$\gamma(\psi_\sigma) = 1 - 6\psi_\sigma \left\{ \left[1 - \tilde{\varepsilon}_i(\sigma_i, t) / \bar{\varepsilon}_i(\sigma_i, t) \right] \right\} / \pi. \quad (6)$$

Система визначальних рівнянь з врахуванням ($\varepsilon_v \neq 0$) і (4), (5), (6) записується у вигляді

$$\begin{cases} \varepsilon_{ij}(t) = \frac{3}{2} \frac{[\pi \pm 6(1 - \gamma_\varepsilon)\psi_\sigma] \bar{\varepsilon}_i(\sigma_i, t)}{\pi \sigma_i(t)} \times \\ \times (\sigma_{ij}(t) - \delta_{ij} \sigma_0(t)) + \frac{1}{3} \delta_{ij} \varepsilon_v(t); \\ \varphi_i(\bar{\varepsilon}_i(t)) = \sigma_i(t) - \gamma_i \int_0^t K_i(t - \tau) \sigma_i(\tau) d\tau; \\ \varphi_v(\varepsilon_v(t)) = \sigma_0(t) + \gamma_v \int_0^t K_v(t - \tau) \sigma_0(\tau) d\tau. \end{cases} \quad (7)$$

де $\varphi_v(\cdot)$, $\varphi_i(\cdot)$ – функції, які задають нелінійність об'ємних і зсувних в'язкопружних властивостей; $\varepsilon_v(\cdot)$ – об'ємна деформація; $K_v(\cdot)$, $K_i(\cdot)$ – функції, які задають ядра об'ємної і зсувної повзучості, задаються дробово-експоненційними функціями; λ_v , λ_i – реологічні параметри.

Експериментальна апробація

Розв'язуються задачі розрахунку деформацій поздовжньої і зсувної повзучостей тонкостінних трубчастих елементів з поліетилену високої щільності ПЭВП і поліетилену низького тиску в умовах одновісного розтягу, чистого кручення і комбінованого навантаження розтягом із крученням з урахуванням впливу виду напруженого стану.

Експериментальні дані, які використані для визначення матеріальних констант і для апробації результатів розрахунків, запозичені з робіт [5].

Результати розрахунків деформацій повзучості тонкостінних трубчастих елементів з поліетилену високої щільності ПЕВЩ в умовах комбінованого навантаження одновісним розтягом і крученням ($\sigma_{11} \neq 0$, $\tau_{21} \neq 0$) співставлені на рис. 3 з експериментальними даними. Результати розрахунків з урахуванням ВНС нанесені штрих-пунктирними лініями, а результати розрахунків без урахування ВНС – штриховими лініями.

Висновки

В роботі розглянуто параметри, що характеризують ВНС і відображають вплив гідростатичної і девіаторної компонент тензора

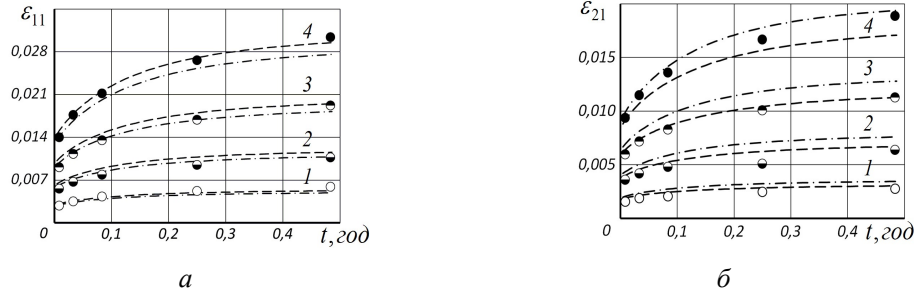


Рис. 3. Деформації повзучості тонкостінних трубчатих елементів з поліетилену високої щільності ПЕВП за умов комбінованого навантаження (1 – $\sigma_{11} = 1,77$, $\tau_{21} = 0,83$; 2 – $\sigma_{11} = 3,54$, $\tau_{21} = 1,66$; 3 – $\sigma_{11} = 5,31$, $\tau_{21} = 2,49$; 4 – $\sigma_{11} = 7,08$, $\tau_{21} = 3,32$ МПа)

напружень на процес деформування. Запропоновано підхід до побудови визначальних рівнянь повзучості нелінійно-в'язкопружних середовищ за умов простих та близьких до простих режимів навантаження, що враховують вплив виду напруженого стану. Врахування залежності деформування від ВНС у визначальних рівняннях, здійснюється за допомогою функції з параметром кута ВНС.

Співставлення результатів розрахунків деформацій повзучості тонкостінних трубчатих елементів з поліетилену при комбінованому навантаженні розтягом із крученням показали, що врахування ВНС якісно і кількісно покращує узгодження з результатами експерименту в порівнянні з розрахунками без його врахування.

Список використаних джерел

1. *Ильюшин А.А.* Пластичность / А.А.Ильюшин – Москва: Изд-во АН СССР, 1963. – 271 с.
2. Пластичность и разрушение / Под ред. В.Л.Колмогорова. – Москва: Металлургия, 1977. – 336 с.
3. *Грешков В.М.* Прогнозирование разрушения металла в процессе холодной пластической деформации / Сообщение 1. Приближенная модель пластической деформации и разрушения металлов / В.М.Грешков, Ю.А.Лавриненко, А.В.Напалков // Пробл. прочности, 1999. – №1. – С. 76-85.
4. *Добранюк Ю.В.* Моделювання напружено-деформованого та граничного станів поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні / Ю.В.Добранюк. – Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук. Інститут проблем міцності ім. Г.С.Писаренка НАНУ. – Київ, 2012. Механика, 2016. – 52, № 6. – С. 111-125.
5. *Креггс А.Ф.* Комплексное исследование полиэтилена высокой плотности в условиях нелинейной ползучести и релаксации напряжений / А.Ф.Креггс, М.Р.Килевич. – Механика композитных материалов, 1985. – №2. – С. 195-201.

References

1. *И'YUSHIN, A.A.* (1963) *Plastichnost*. Moskva: Izd-vo AN SSSR.
2. *KOLMOGOROV, V.L.* et al. (1977) *Plastichnost i razrushenie*. Moskva: Metallurgiya.
3. *GRESHKOV, V.M., LAVRINENKO, Yu.A., NAPALKOV, A.V.* (1999) Prognozirovanie razrusheniya metalla v processe holodnoy plasticheskoy deformacii. Soobshchenie 1. Priblizhennaya model plasticheskoy deformacii i razrusheniya metallov. *Problemy prochnosti*.1. pp. 76-85.
4. *DOB RANYUK, Yu.V.* (2016) *Modelyuvannya napruzhenno-deformovanogo ta granychnogo staniv poverhni cylindrychnykh zrazkiv pry torcevomu stysnenni* / Avtoreferat dysertacii na zdobuttya naukovoogo stupenya kand. tehn. nauk. Instytut problem micnosti im. G.S.Pysarenka NANU, Kyiv, 52(6). pp. 111-125.
5. *KREGERS, A.F., KILEVICH, M.R.* (1985) Kompleksnoe issledovanie polietilena vysokoy plotnosti v usloviyah nelineynoy polzuchesti i relaksacii napryazheniy. *Mechanika compozitnykh materialov*. 2. pp. 195-201.

Надійшла до редколегії 29.08.21