

**Костогрив С.Г.,
Мисліборський В.В.**

Хмельницький національний університет,
м. Хмельницький, Україна
E-mail: mvovka13@gmail.com

**ПАРАМЕТР ПЛАСТИЧНОСТІ – БАЗОВИЙ
КРИТЕРІЙ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ
ПРУЖНО - ПЛАСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

УДК 621.891:620.194

Обґрунтоване використання для кількісного оцінювання пластичної частини деформації твердого тіла при одноосному розтягу нового, запропонованого авторами критерію – параметра пластичності, що являє собою відношення пластичної частини накопиченої деформації твердого тіла до її пружної частини. Показано, що параметр пластичності є базовим критерієм для характеристики конструкційних матеріалів.

Ключові слова: повзучість, номінально нерухомий фрикційний контакт (ННФК), тангенціальна жорсткість ННФК, параметр пластичності контакту, одноосний розтяг, відносна деформація зсуву, пластичні властивості, пружно-пластичні властивості, реологічна модель.

Вступ

Пряма залежність між зсувною силою τ (тангенціальна складова) та переміщенням δ наявна лише в початковій стадії процесу навантаження. У міру наближення до максимального значення зсуву зв'язок між цими величинами набуває нелінійного характеру (переміщення наростає швидше, ніж зсувна сила). Залежність між номінальним дотичним напруженням τ в контакті і дотичним переміщенням елементів контакту (крива початкового навантаження) показана на рис. 1.

Мета і постановка задачі

Робота виконується з метою обґрунтування використання параметра пластичності як базового критерію для характеристики пружно-пластичних властивостей конструкційних матеріалів.

Виклад матеріалів досліджень

1. Закономірність процесу деформування номінально-нерухомого фрикційного контакту (ННФК) зсуваючою силою

Одним з основних результатів дослідження контактної взаємодії при тангенціальному навантаженні номінально нерухомого фрикційного контакту в межах попереднього зміщення [1] є одержання достатньо точної аналітичної залежності для кривої навантаження (рис. 1), яка описується рівнянням:

$$\begin{cases} \tau = qf \left[\varepsilon - \frac{n}{(n+1)^{\frac{n+1}{n}}} \cdot \varepsilon^{\frac{n+1}{n}} \right], \text{ при } 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\max} \\ \tau = qf, \text{ при } \varepsilon \geq \varepsilon_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

де τ – тангенціальне напруження в контакті;

$\varepsilon = \frac{x}{\Delta_{np}}$ – відносна деформація зсуву елементів контакту;

x – поточне значення деформації зсуву елементів контакту;

Δ_{np} – пружна частина повного попереднього зміщення в контакті;

q – номінальний тиск у контакті;

f – статичний коефіцієнт тертя в контакті;

n – параметр кривої тангенціального навантаження (параметр пластичності контакту).

Не буде перебільшенням, коли зауважити, що рівняння (1) є універсальним для номінально нерухомого фрикційного контакту, який має пружно-пластичні властивості. Посилення або послаблення пластичних властивостей контакту у рівнянні (1) враховується певним значенням параметра кривої навантаження (рис. 2).

Встановлення такої залежності базується на сучасних дослідженнях пружно-пластичного деформування твердого тіла (рис. 2) і, перш за все, на основних положеннях теорії мікропластичного деформування [2], які дозволили моделювати номінально нерухомий фрикційний контакт реологічною моделлю з нескінченною кількістю паралельно з'єднаних між собою реологічних елементів Прандтля (рис. 3).

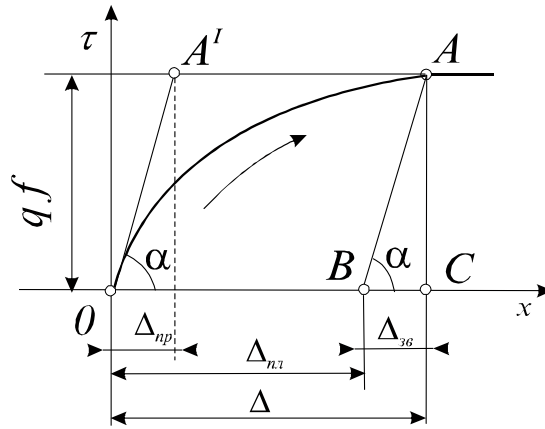


Рис. 1 – Крива початкового навантаження номінально нерухомого фрикційного контакту [1]

$$n = \frac{\Delta - \Delta_{np}}{\Delta_{np}}, \quad (2)$$

де Δ – повне попереднє зміщення в контактї;

Δ_{np} – пружна частина повного попереднього зміщення в контактї.

Не буде перебільшенням, коли зауважити, що рівняння (1) є універсальним для номінально нерухомого фрикційного контакту, який має пружно-пластичні властивості. Посилення або послаблення пластичних властивостей контакту у рівнянні (1) враховується певним значенням параметра кривої навантаження (рис. 2).

Встановлення такої залежності базується на сучасних дослідженнях пружно-пластичного деформування твердого тіла (рис. 2) і, перш за все, на основних положеннях теорії мікропластичного деформування [2], які дозволили моделювати номінально нерухомий фрикційний контакт реологічною моделлю з нескінченною кількістю паралельно з'єднаних між собою реологічних елементів Прандтля (рис. 3).

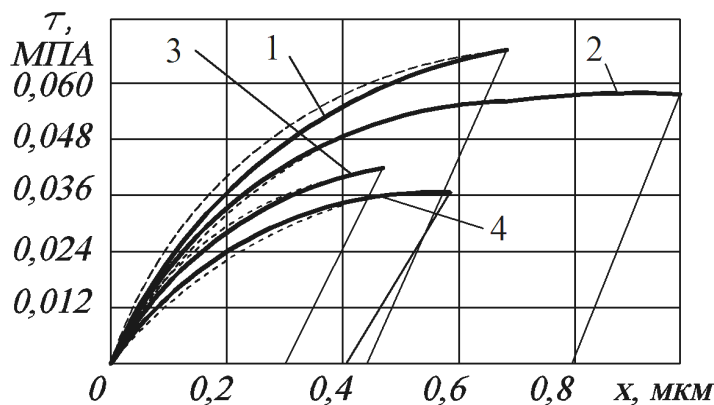


Рис. 2 – Порівняння експериментальних кривих н авантаження одержаних Є.М. Лєвіноюдля сталевих напрямних ковзання з розрахунковими кривими, які розраховані за рівнянням(1):

1 - 2 – при $q = 35 \text{ Н/см}^2$;

3 - 4 – при $q = 18 \text{ Н/см}^2$.

Криві 1 та 3 відповідають контактуванню без мастила, а 2 та 4 відповідають контактуванню з мастилом.

--- розрахункова крива, розрахована по формулі(1);

— – експериментальна крива

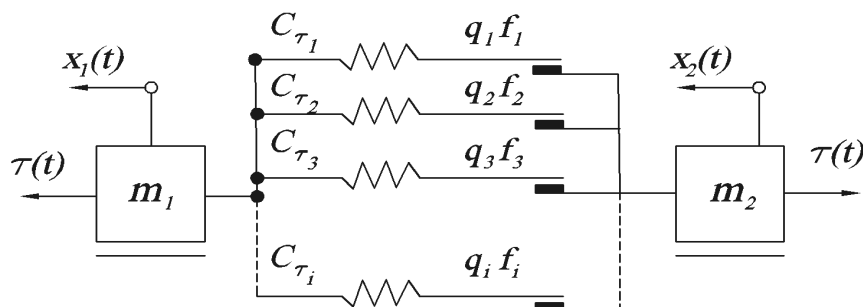


Рис. 3 – Розрахункова реологічна модель ННФК з пружно - пластичними властивостями (модель Прадтля) при вібраційному навантаженні:
– взаємне переміщення елементів контакту при їх зсуві

2. Дослідження М.М. Давиденкова

Слід звернути увагу на те, що одержане рівняння(1) за своєю структурою подібне рівнянню кривої навантаження, яке одержав М.М. Давиденков для деформованого твердого тіла [3]. У зв'язку з цим викликає інтерес наступне питання. М.М. Давиденков при виводі рівняння кривої навантаження використав залежність уявного, в російській транскрипції “кажущегося” модуля пружності суцільного середовища від деформації при одноосному розтягу у вигляді:

$$\frac{\overrightarrow{d\sigma}}{d\varepsilon_*} = E(1 - \eta\varepsilon_*^k) \quad (3)$$

де σ – нормальне напруження;

ε_* – відносна деформація в поняттях теорії пружності;

E – модуль пружності першого роду;

η і k – емпіричні коефіцієнти.

За своєю сутністю відношення $\frac{\overrightarrow{d\sigma}}{d\varepsilon_*}$ виражає жорсткість тіла (зразка) при одноосному деформуванні.

На основі одержаного нами рівняння(1) можна досить просто перейти до наступного рівняння, що виражає жорсткість контакту $d\tau/d\varepsilon$ при тангенційному навантаженні:

$$\frac{\overrightarrow{d\sigma}}{d\varepsilon} = qf \left[1 - \frac{1}{(n+1)^{\frac{1}{n}}} \varepsilon^n \right] \quad (4)$$

3. Про аналогії між рівняннями (3) та (4)

Порівняння рівняння (3) з рівнянням (4), одержаним нами не залишає сумнівів у їх аналогічності. Причому, аналогом E у рівнянні(3) виступає qf у рівнянні (4), аналогом η виступає $(n+1)^{-\frac{1}{n}}$ а аналогом k виступає $\frac{1}{n}$. Слід звернути увагу на граничні випадки. Перший має місце при $n = 0$, коли ННФК чи матеріал, що підлягає деформуванню, є абсолютно пружним, тобто позбавлений пластичних властивостей. При цьому з рівняння (1) та (3) витікає, що $\tau = qf\varepsilon$, а $\sigma = E\varepsilon_*$. Ці залежності є не що інше, як закон Гука. В пружно - пластичних матеріалах, як і в ННФК параметр пластичності перебуває в межах $0 \leq n \leq \infty$. Другий випадок стосується ситуації коли $n = \infty$. При цьому $\tau = qf$, а відповідно до рівняння(3) $\sigma = \sigma_m$, де σ_m – границя текучості.

Виявлена нами аналогія між рівнянням, яке одержав М.М. Давиденков для одноосного деформування твердого тіла і рівнянням(1) та (4) отриманими нами дають підставу використовувати дещо перетворене рівняння(1) для опису кривої “напруження - деформація” твердого тіла при одноосному розтягу. На основі виявлених аналогій запишемо рівняння кривої “напруження - деформація” при одноосному розтягу твердого тіла у вигляді.

4. Використання параметра пластичності для опису процесу деформування конструкційних матеріалів

$$\sigma = \sigma_e \left[\frac{E}{\sigma_e} \varepsilon_* - \frac{n}{(n+1)^{\frac{n+1}{n}}} \cdot \left(\frac{E}{\sigma_e} \varepsilon_* \right)^{\frac{n+1}{n}} \right], \quad (5)$$

де σ_e – границя міцності при розтягу.

При одноосному розтягу твердого тіла параметр пластичності визначається за співвідношенням:

$$n = \frac{\varepsilon_{nl}^*}{\varepsilon_{np}^*}, \quad (6)$$

де ε_{np}^* – пружна частина відносної деформації (рис.4),

ε_{nl}^* – пластична частина максимальної відносної деформації.

Якщо для одноосного розтягу твердого тіла застосувати поняття відносної деформації таке ж саме як і для ННФК, то рівняння кривої “напруження - деформація” для одноосного розтягу запишемо аналогічно рівнянню (1):

$$\sigma = \sigma_e \left[\varepsilon - \frac{n}{(n+1)^{\frac{n+1}{n}}} \cdot \varepsilon^{\frac{n+1}{n}} \right], \quad \text{при } 0 \leq \varepsilon \leq n+1 \quad (7)$$

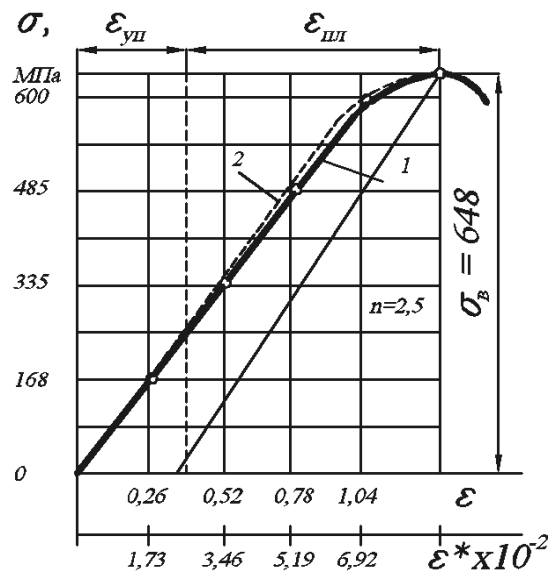


Рис. 4 – Залежність “напруження - деформація” при одноосному розтягу зразка із сталі 45 (гартування, HRC 40):

1 – розрахункова крива;
2 – експериментальна крива

На рис.4 представлена експериментально отримана залежність “напруження - деформація” при одноосному розтягу зразка із сталі 45, загартованої до твердості HRC 40 (1 – розрахункова за формулою (7) залежність і експериментальна – 2). Слід звернути увагу на досить задовільне співпадання теоретичної та експериментальної залежності.

Висновки

1. Математичне моделювання попереднього зміщення у номінально нерухомому фрикційному контакті (ННФК) дозволило вивести досить точну аналітичну залежність для кривої навантаження “напруження - деформація”, використання якої відкриває можливість досліджувати процеси, що відносяться до задач тертя спокою як при постійних, так і при циклічних навантаженнях. Їх можна також застосовувати до механіки твердого деформованого тіла при одноосному розтягу, використовуючи виявлені вище аналогії.

2. Базовим критерієм, що характеризує пластичні властивості ННФК є його параметр пластичності, що являє собою відношення пластичної (залишкової) частини повного попереднього зміщення до його пружної (зворотної) частини.

3. Показано, що для характеристики пластичних властивостей твердого деформованого тіла при одноосному деформуванні виявляється можливим використовувати параметр пластичності матеріалу, як відношення пластичної частини накопиченої деформації до моменту, що відповідає досягненню напруження границі текучості, до пружної частини деформації.

4. Використання параметра пластичності як для ННФК, так і для конструкційних матеріалів дозволяє розширити закон Гука на пластичну частину діаграми “напруження - деформація” і дає підстави стверджувати, що параметр пластичності є однією із базових механічних характеристик конструкційних матеріалів, який потрібно дослідити для різних класів і груп машинобудівних матеріалів та ввести його у відповідну довідникову літературу.

Література

1. Костогрыз С. Г. Механика вибрационного трения в номинально неподвижном фрикционном контакте: дис... д-ра техн. наук: 05.02.04 “Трение и износ” / Костогрыз Сергей Григорьевич. – Хмельницький, 1995. – 367 с.

2. Костогрыз С. Г. Математическое моделирование предварительного смещения в номинально неподвижном фрикционном контакте / С. Г. Костогрыз, Я. Н. Гладкий // Проблемы трибологии. – 1996. – № 1. – С. 5–15.

3. Давыденков Н. Н. Избранные труды: в 2-х томах / Н. Н. Давыденков. – К.: Наукова думка, 1981. – 24с.

4. Левина З. М. Контактная жесткость машин / З. М. Левина, Д. Н. Решетов // Изд. вузов. Машиностроение. – 1971. – С. 240

Поступила в редакцію 19.12.2016

Kostogryz S.G., Misliborski V.V. **Parameter plasticity - the basic criterion for evaluation of elastic-plastic properties of construction materials.**

The application for quantitative evaluation of plastic deformation of solids under uniaxial tensile new authors proposed criterion - setting plasticity, which is the ratio of accumulated plastic deformation of solids to its elastic parts. It is shown that plasticity parameter is the basic criterion for the characterization of structural materials.

Keywords: creep nominally fixed frictional contact (NNFK), tangential stiffness NNFK parameter plasticity contact uniaxial tensile deformation relative displacement, plastic properties, elastic-plastic properties, rheological model.

References

1. Kostogryz S. G. Mehanika vibracionnogo trenija v nominal'no nepodvizhnom frikcionnom kontakte: dis... d-ra tehn. nauk: 05.02.04 "Trenie i iznos". Kostogryz Sergej Grigor'evich. Hmel'nickij, 1995. 367 s.
2. Kostogryz S. G. Matematicheskoe modelirovanie predvaritel'nogo smeshhenija v nominal'no nepodvizhnom frikcionnom kontakte. S. G. Kostogryz, Ja. N. Gladkij. Problemi tribologii. 1996. № 1. S. 5–15.
3. Davydenkov N. N. Izbrannye trudy: v 2-h tomah. N. N. Davydenkov. K.: Naukova dumka, 1981. 24s.
4. Levina Z. M. Kontaktnaja zhestkost' mashin. Z. M. Levina, D. N. Reshetov. Izd. vuzov. Mashinostroenie. 1971. S.240.