

УДК 539.4

Є.В. Савчук, Д.К. Фам, О.В. Тимошенко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

### Дослідження полів розподілу параметрів виду напруженого стану для сплаву Д16т з врахуванням пошкоджуваності

На сучасному етапі розвитку машинобудування розроблено багато відповідальних елементів конструкцій, які працюють в умовах складного термо-силового навантаження. При розробці цих елементів, одним з основних критеріїв при проектуванні є економічність та матеріаломісткість конструкції зі збереженням функціональних характеристик міцності та жорсткості. Тому важливою складовою проектного розрахунку є можливість прогнозування ресурсу відповідальних елементів конструкцій, з врахуванням основних термосилових параметрів експлуатаційних навантажень. Дані які отримані з простих експериментів на розтяг, не дають повної картини для оцінки ресурсу відповідальних елементів конструкцій при складному термо-силовому навантаженні. Це призводить до небезпечного зниження запасу міцності та жорсткості, або в напрямку недоцільного використання міцності матеріалу.

Виходячи з викладеного, актуальним є дослідження параметрів впливу виду напруженого стану (ВНС) на фізико-механічні характеристики конструкційних матеріалів, які є основою для розробки достовірних феноменологічних моделей та критеріїв граничного стану.

В даній роботі представлено результати дослідження розподілу параметрів ВНС в зразках з концентраторами напружень, які використовують для дослідження впливу ВНС на характеристики алюмінієвого сплаву типу Д16т.

Враховуючи значну кількість досліджень, відомо що ВНС суттєво впливає на граничну величину пластичної деформації та характер руйнування. В роботах [1,2] запропоновано характеризувати ВНС використовуючи параметри, що базуються на трьох інваріантах тензора напружень:

$$\eta = \frac{\sigma_0}{\sigma_i} \quad (1)$$

де  $\sigma_0$  - середнє гідростатичне напруження,  $\sigma_i$  - інтенсивність напруження.

Параметр жорсткості напруженого стану  $\eta$ , враховує перший інваріант тензора  $I_1$  та другий інваріант девіатора напружень  $J_2$ .

Використання лише коефіцієнта жорсткості напруженого стану  $\eta$  - є недостатнім для опису поверхні Мізеса, як представлено на рис.1.

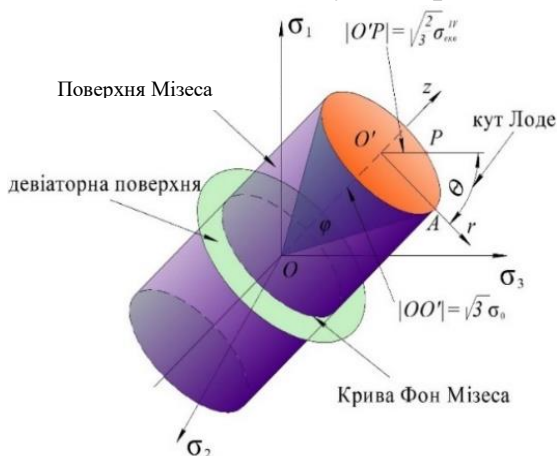


Рис. 1. Поверхня Мізеса

Тому необхідно враховувати ще один параметр ВНС, який враховує третій інваріант  $J_3$  девіаторної частини тензора напружень  $[S]$ :

$$\xi = \frac{27 J_3}{2 \sigma_i^3} \quad (2)$$

Зв'язок кута Лоде  $\theta_L$  з параметром виду напруженого  $\xi$ , наведено в роботі [1]:

$$\xi = \cos(3\theta_L); \quad (3)$$

Якщо враховувати залежність кута Лоде в головних напруженнях, як наведено в роботі [3]:

$$\text{tg}(\theta_L) = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}; \quad (4)$$

та параметр Надаї-Лоде:

$$\mu = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (5)$$

Отримаємо залежність Надаї-Лоде від параметра  $\xi$ :

$$\mu = \sqrt{3} \cdot \text{tg} \left[ \frac{1}{3} \arccos(\xi) \right]; \quad [-1:1] \quad (6)$$

Параметр Надаї-Лоде  $\mu$  дозволяє описати не тільки ВНС та вплив другого головного напруження, а й вид похилих площин, за якими відбувається ковзання (як один з механізмів пластичного деформування). Він вказує на вплив інших двох екстремальних дотичних напружень[3].

Для дослідження напруженого стану було обрано циліндричні зразки з концентраторами напружень, вид яких представлено на рис. 2.

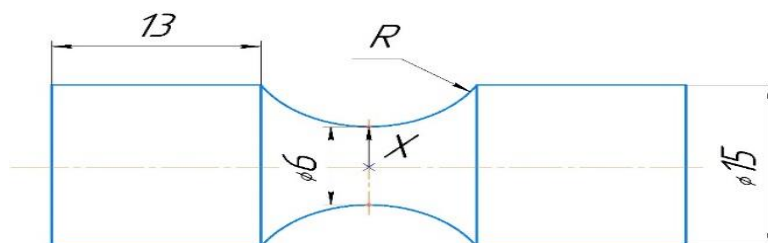


Рис. 2. Креслення зразка з концентратором напружень, розміри в мм.

Розрахунки методами чисельного моделювання, проводились в програмному комплексі Ansys Workbench з використанням ефективної кривої діаграми, яка враховує кінетику накопичення пошкодження через зміну

питомого електричного опору для алюмінієвого сплаву Д16т, експериментальні дані яких було отримано в роботі [5].

Використанням повної кривої деформування, де нелінійна частина була представлена у вигляді експериментальних точок, приводить до більш складних розрахунків об'ємної задачі. Так як зразки симетричні, то розрахунки проводилися як для осесиметричної задачі, що дозволило скоротити час обчислення, враховуючи пластичні характеристики матеріалу. Поля розподілу еквівалентних напружень представлено на рис.3.

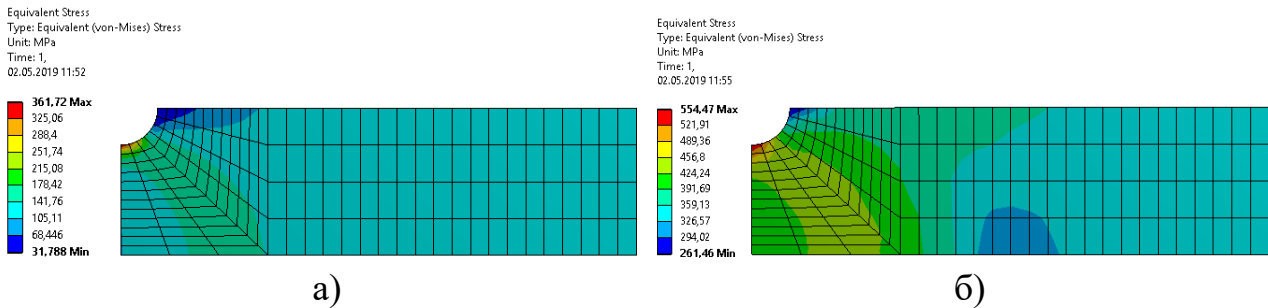


Рис.3. Розподіл еквівалентних напружень для зразка з R=1мм: а) - в пружній зоні, б) – в пластичній зоні

З рис.3 видно нерівномірний розподіл напруження вздовж радіусу перерізу X, що в свою чергу теж впливає на розподіл параметрів виду напруженого стану залежно від концентратора напружень. Результати розподілу параметрів впливу ВНС представлено на рис.4 та рис.5.

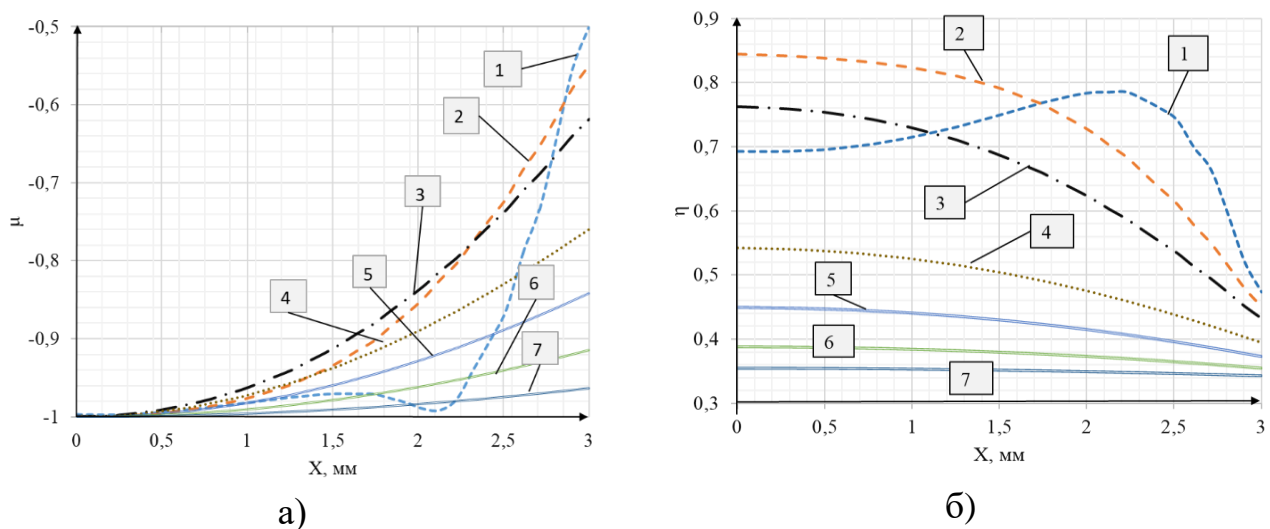


Рис.4. Розподіл параметра  $\mu$  (а) та параметра  $\xi$  (б) в пружній зоні, з різними концентраторами напруження: №1 – R=1мм, №2 – R=2мм, №3 – R=3мм, №4 – R=6мм, №5 – R=10мм, №6 – R=20мм, №6 – R=50мм

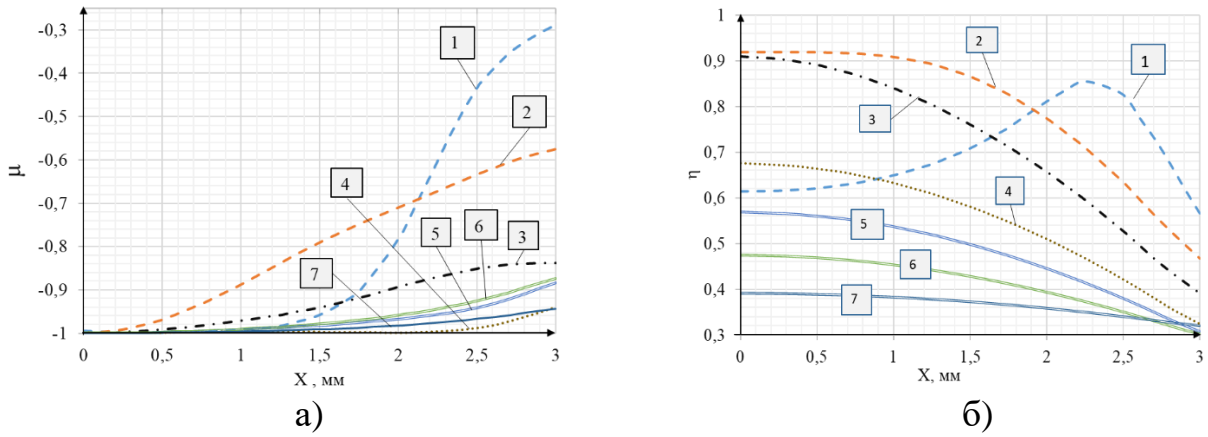
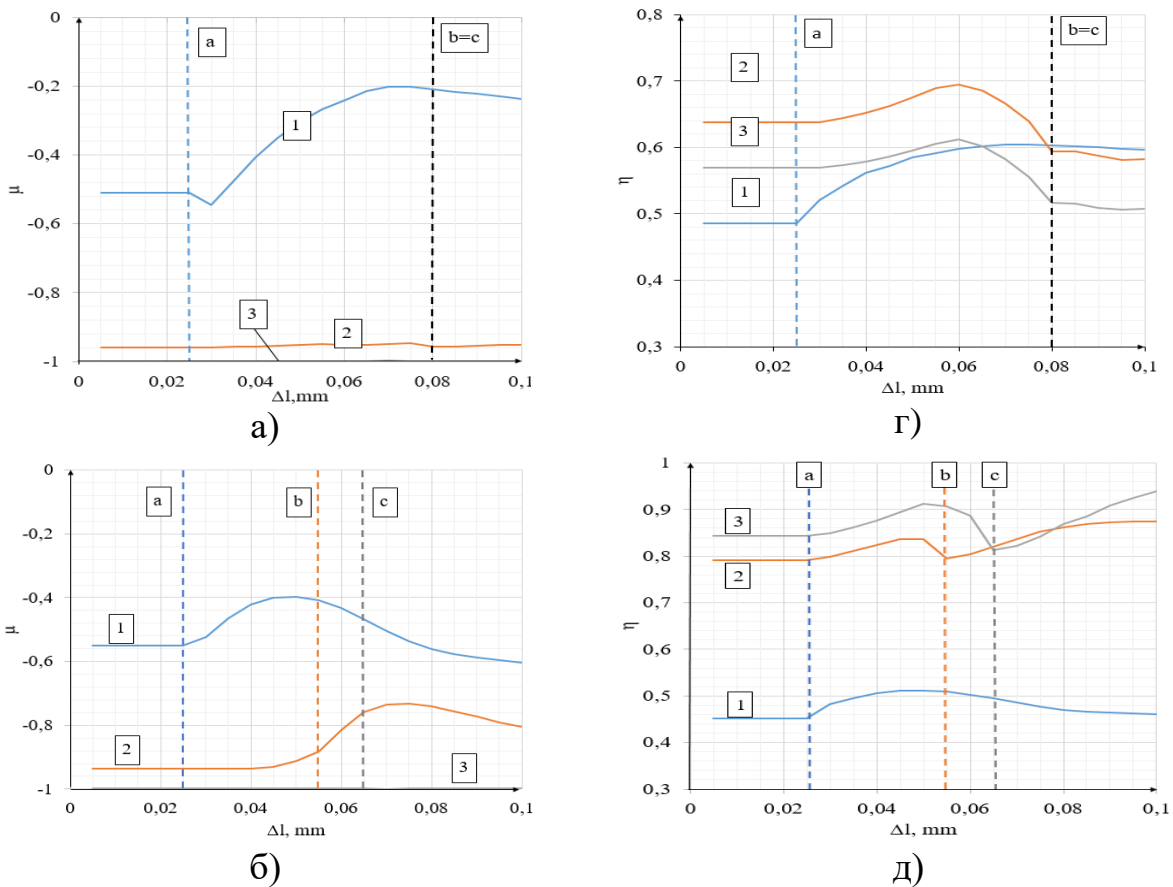


Рис.5. Розподіл параметра  $\mu$  (а) та параметра  $\xi$  (б) в пластичній зоні, з різними концентраторами напруження: №1 – R=1мм, №2 – R=2мм, №3 – R=3мм, №4 – R=6мм, №5 – R=10мм, №6 – R=20мм, №6 – R=50мм

На основі результатів отриманих на рис. 4 та рис. 5 в центрі зразка при  $X=0$  мм,  $\mu=-1$ , що відповідає чистому розтягу, в той час як параметр  $\eta \neq 0,333$ , що цьому не відповідає. З цього випливає, що для повної оцінки впливу ВНС необхідно враховувати обидва параметра та їх розподіл.

На рис. 6 представлено зміна параметрів виду напруженого стану від рівня пластичної деформації для небезпечної точки при  $X=3$ мм, середньої точки при  $X=1,5$  мм та в середині зразка при  $X=1$  мм.



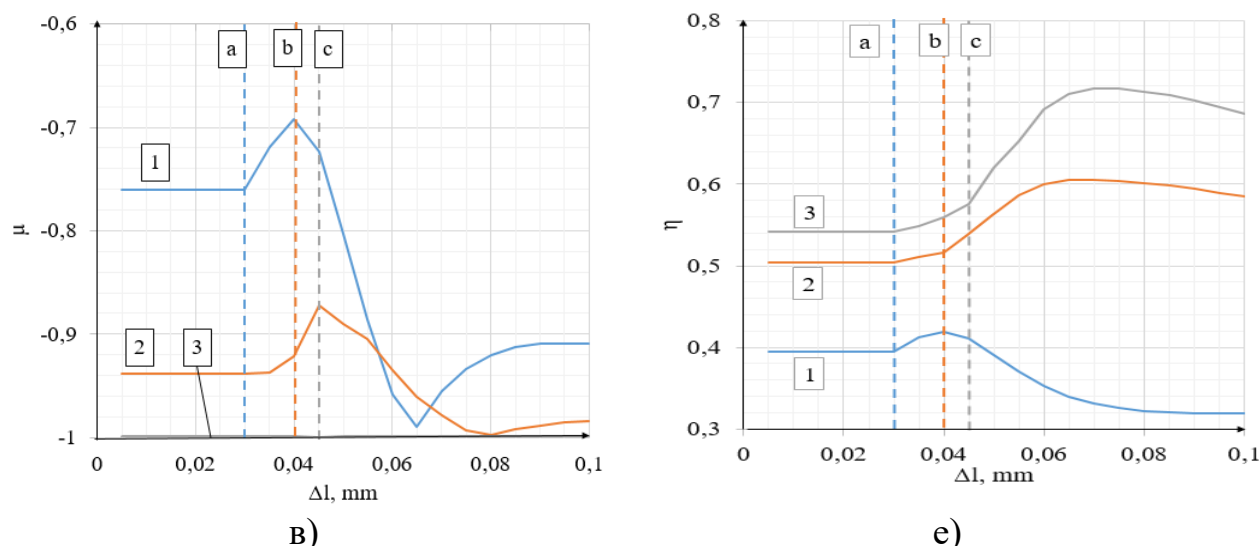


Рис.6. Залежність параметра  $\mu$  від величини деформації для зразків з концентраторами: (а)-  $R=0,75\text{мм}$ , (б) -  $R=2\text{мм}$ , (в)-  $R=6\text{мм}$ , та залежність параметра  $\xi$  від деформації для зразків з концентраторами: (г)-  $R=0,75\text{мм}$ , (д) -  $R=2\text{мм}$ , (е)-  $R=6\text{мм}$  (1-при  $X=3\text{мм}$ , 2-при  $X=1,5\text{мм}$ , 3- при  $X=0\text{мм}$ )

На рис.6, а- границя початку пластичної деформації для кривої 1, б - відповідно для кривої 2 та с- для кривої 3, що зміна параметрів ВНС починається не тільки в пластичній зоні, а й в пружній.

#### Висновки:

1. Отримано розподіли параметрів ВНС для алюмінієвого сплаву Д16т, які показують, що при зростанні рівня пластичної деформації в небезпечній точці параметри ВНС можуть не тільки зростати, як було прийнято в більшості праць, а мають більш складний характер своєї зміни.

2. За результатами досліджень, показано необхідність враховувати одночасно два параметра впливу ВНС для побудови феноменологічних моделей.

3. Показано, що параметри ВНС змінюються не тільки при переході в пластичну зону, а й в пружній в залежності від типу концентратора напруження з врахуванням пошкодження.

#### Список використаних джерел

1. Wang K. Calibration of the Johnson-Cook Failure Parameters as the Chip Separation Criterion in the Modelling of the Orthogonal Metal Cutting Process / Keyan Wang, 2016. – 103 с.

2. Xue L. Ductile Fracture Modeling - Theory, Experimental Investigation and Numerical Verification / Liang Xue, 2007. – 228 с.

---

3. Cabrera C. C. Ductile failure prediction using phenomenological fracture model for steels: calibration, validation and application / Carlos Cuenca Cabrera, 2018. – 110 с.

4. К вопросу построения предельной поверхности прочности торфяных структурных систем / Б. Ф.Зюзин, В. А. Мироно, А. Б. Зюзин, С. А. Юдин. // Вестник. – №26. – С. 41–50.

5. Кінетика розсіяного руйнування металевих конструкційних матеріалів при пружно-пластичному деформуванні / М.І. Бобир, А.П. Грабовський, О.П. Халімон, О.В. Тимошенко, О.М. Масло // Проблеми прочності. — 2007. — № 3. — С. 23-34. — Бібліогр.: 11 назв. — укр.