

ВПЛИВ ЛОКАЛЬНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛИСТОВИХ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЇХ ПЛАСТИЧНІСТЬ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі представлено огляд сучасних досліджень щодо впливу локальних мікроструктурних неоднорідностей на пластичність листових металевих матеріалів. Розглянуто основні типи неоднорідностей — зони без преципітатів, текстурна анізотропія, фазова неоднорідність та залишкові напруження — і проаналізовано механізми формування «слабких» зон. Узагальнено експериментальні дані та встановлено величину впливу неоднорідностей на локальну граничну пластичну деформацію.

Ключові слова: пластична деформація, зони без преципітатів, PFZ; текстурна анізотропія; фазова неоднорідність; залишкові напруження.

Листові металеві матеріали відіграють ключову роль в авіаційній, автомобільній та машинобудівній промисловості завдяки високій відносній міцності та добрій пластичності. Класичні теоретичні моделі передбачають однорідні властивості зразка. Проте експериментальні дослідження показують, що навіть незначні локальні неоднорідності можуть суттєво впливати на граничну пластичну деформацію та призводити до передчасного утворення тріщин і руйнування [1, 2].

Основними типами неоднорідностей, які впливають на пластичність матеріалів є наступні:

1) Зони без преципітатів (Precipitate-Free Zones, PFZ). Механізм їх впливу полягає в тому, що в околі між зернами осаджувальні преципітати (Al_2Cu , Mg_2Si) не формуються або їхня щільність значно знижена, тому ці «порожні» смужки мають менший опір руху дислокацій, що призводить до локального зниження межі текучості та ϵ_u на 30–40 % порівняно з матрицею та пришивдженій ініціації тріщин [3].

2) Текстурна анізотропія проявляється в переважній кристалографічній орієнтації, яка набута під час прокатки, та призводить до зміни активності ковзних систем залежно від напрямку навантаження. Результатом цього може бути різниця ϵ_u до 30 % при навантаженні вздовж і впоперек прокатного напрямку (див. таблицю 1) [4].

3) Фазова неоднорідність може бути представлена у вигляді різних за пластичністю та міцністю сусідніх ділянок. Її результатом є локальне зниження інтенсивності деформацій ϵ_u у твердих «острівцях» до ≈ 5 % проти 15 % у м'якій зоні, формування двоетапного утворення тріщин [5].

4) Неметалічні включення та пористість. Включення (оксиди, сульфід) та мікропори є концентраторами напружень, що ускладнює рух дислокацій та погіршує пластичність. Результатом їх наявності є зародження мікротріщин при $\epsilon \approx 2$ –3% в околі включення, загальне гранична деформація ϵ_u падає на 10–20 % [6].

5) Залишкові напруження. Нерівномірне охолодження чи нагрівання під час виготовлення листових матеріалів в процесі зварювання, старіння чи відпуску призводять до появи залишкових напружень до 100–150 МПа. Локальні залишкові напруження додаються до зовнішнього навантаження, знижує граничну пластичну деформацію ϵ_u у термічній зоні впливу на 40–50 % [7].

6) Дислокаційні скупчення та кластери. Під час пластичної деформації утворюються локальні зони високої густини дислокацій (кластери), що ділять зерна на «підзерна», такі зони мають підвищену міцність, але знижують однорідність деформації, що може сприяти її локалізації [8].

7) Градієнт зерен (зонаваний розмір зерен). Нерівномірний розподіл розміру зерен по товщині листа (фракційна зона) створює різні за міцністю і пластичністю ділянки, а градієнт властивостей сприяє локалізації деформації на межі переходу.

8) Хімічна неоднорідність (легування). Нерівномірний розподіл легуючих елементів (Ni, Cr, Mo) у сталі чи Al-сплавах створює локальні варіації $\sigma_{0.2}$ і ϵ_u , що ускладнює прогнозування властивостей [9] та підвищує варіативність.

Вплив різних типів неоднорідностей на пластичність матеріалу, за літературними джерелами [4–7], наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Вплив неоднорідностей матеріалу на локальне значення пластичної деформації

Матеріал	Тип неоднорідності	Середнє значення граничної деформації по зразку ϵ_u , %	Локальне значення граничної деформації в зоні неоднорідності ϵ_u , %	Відносна зміна граничної деформації, %
Al 2024-T6	PFZ	17,5	11,3	34,5
Al 6016	Текстурна	18,0	11,0	39
DP980	Фазова	13,4	9,1	32
Al 6061-T6	Залишкові напруження	15,8	9,1	42

Експериментальні дослідження, зокрема метод цифрової кореляції зображень (DIC), дозволяють виявити зони локалізації деформації та оцінити вплив неоднорідностей на граничну деформацію. Чисельне моделювання з використанням методу скінченних елементів (FEM) та врахуванням стохастичних полів властивостей дозволяє прогнозувати поведінку матеріалу під навантаженням з урахуванням реальних неоднорідностей. Водночас ці методи або реєструють факт локалізації (DIC), або прогнозують для заданих умов один із можливих варіантів структури і властивостей, але не відповідають на запитання про ризики виготовлення чи експлуатації виробів.

Висновки

1) Критичність локальної неоднорідності. Наведені типи мікроструктурних неоднорідностей — PFZ, текстурна анізотропія, фазова неоднорідність, включення, залишкові напруження, дислокаційні кластери, градієнт зерен та хімічна гетерогенність — здатні знижувати граничну пластичну деформацію ϵ_u на 30–50 % у локальних зонах порівняно із середнім по зразку значенням.

2) Механізми локалізації. Усі перераховані фактори об'єднує спільний механізм: вони створюють ділянки зі зниженим опором руху дислокацій або з підвищеним напруженим градієнтом, що ініціює раннє мікротріщиноутворення.

Список використаної літератури

1. Uchic M. D., Dimiduk D. M., Florando J. N., Nix W. D. Sample dimensions influence strength and crystal plasticity // Science. — 2004. — Vol. 305. — P. 986–989. <https://doi.org/10.1126/science.1098993>
2. Сивак Р.І., Матвійчук В.А., Грушко О.В. Немонотонна пластична деформація в процесах обробки металів тиском. — Вінниця: ВНАУ, 2022. — 202 с.
3. Esmaeili S., Lloyd D. J., Poole W. J. Modeling the evolution of precipitates during aging of Al–Mg–Si alloys // Acta Materialia. — 2003. — Vol. 51, № 17. — P. 5565–5578. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00426-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00426-6)
4. Pohl M., Starke P., Eggeler G. Texture and anisotropy of plastic properties in aluminum alloys // Materials Science Forum. — 1991. — Vol. 157–162. — P. 887–892. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.157-162.887>
5. Kahn H., Yao Y. L., Anderson R. Strain localization in dual-phase steels // Scripta Materialia. — 2001. — Vol. 45, № 6. — P. 653–660. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(01\)01105-5](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(01)01105-5)
6. Jin X., Edwards P. D., Khan T. Mechanical response of friction stir spot welded aluminum alloys under tension // Journal of Materials Processing Technology. — 2022. — Vol. 302. — P. 117486. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117486>
7. Chen Y. C., Nakata K. Effect of welding parameters on mechanical properties and microstructure of aluminum alloy 6061-T6 joined by friction stir welding // Materials & Design. — 2009. — Vol. 30, № 9. — P. 3363–3369. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.07.063>
8. Bellón B., Haouala S., LLorca J. An analysis of the influence of precipitate type on mechanical behavior of Al–Cu alloys by means of micropillar compression tests // Acta Materialia. — 2020. — Vol. 200. — P. 233–245. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.08.039>
9. Zubair M., Hegadekatte V., Zaefferer S. Stochastic modeling of flow behavior in heterogeneously structured metals // Computational Materials Science. — 2019. — Vol. 167. — P. 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2019.05.009>

Савуляк Віктор Валерійович – к.т.н., доцент кафедри технології та автоматизації машинобудування. Вінницький національний технічний університет, e-mail: vvs_81@vntu.edu.ua

Білосточний Володимир Олександрович – аспірант кафедри технології та автоматизації машинобудування. Вінницький національний технічний університет

INFLUENCE OF LOCAL INHOMOGENEITY OF THE PROPERTIES OF SHEET METAL MATERIALS ON THEIR PLASTICITY

Abstract

The paper presents a review of modern research on the influence of local microstructural inhomogeneities on the plasticity of sheet metal materials. The main types of inhomogeneities are considered - zones without precipitates,

textural anisotropy, phase inhomogeneity and residual stresses - and the mechanisms of formation of "weak" zones are analyzed. Experimental data are summarized and the magnitude of the influence of inhomogeneities on local ultimate plastic deformation is established.

Keywords: *plastic deformation, zones without precipitates, PFZ; textural anisotropy; phase inhomogeneity; residual stresses.*

Savulyak Victor V. — Associated Professor, Ph.D., Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail:
vvs_81@vntu.edu.ua

Bilostechny Volodymyr O. – Postgraduate student, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia