

# СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНІ МЕТОДИ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗІ СТРУКТУРНО НЕОДНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ (Огляд)

О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, Н.І. Півторак

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [asmilenin@ukr.net](mailto:asmilenin@ukr.net)

Проведено критичний аналіз літературних даних про методи чисельного аналізу технічного стану великогабаритних конструкцій зі структурно неоднорідних матеріалів. В рамках умовного розділення цих методів на три класи – макроструктурні, мезоструктурні та мультимасштабні – показано основні переваги та недоліки їх використання для прогнозування процесів, що визначають якість та міцність типових конструкцій зі структурнонеоднорідних металів і композиційних матеріалів. Бібліогр. 42, рис. 2.

*Ключові слова:* великогабаритні конструкції, неоднорідні матеріали, композиційні матеріали, технічний стан, скінченно-елементне моделювання, зварні з'єднання

Для розв'язання типових задач проектування, визначення технічного стану та прогнозування міцності великогабаритних конструкцій різного призначення (посудин тиску, панелей, балок, ферм) прийнято використовувати відповідні аналітичні методи визначення їх граничного стану з урахуванням фактичних властивостей матеріалу, результатів дефектоскопії та конкретного механізму руйнування. При реалізації відповідних алгоритмів необхідним є схематизація як геометричних особливостей конкретної конструкції та її окремих елементів, так і поведінки матеріалу в залежності від умов зовнішнього впливу. Зокрема, характерним припущенням є розгляд матеріалу як однорідного та ізотропного, що суттєво спрощує методи аналізу, дозволивши використовувати засади лінійної механіки пружного суцільного середовища. Проте ці підходи є обмежено застосовними при аналізі стану просторово неоднорідних конструкцій, до яких відносяться просторово неоднорідні метали та сплави, композити, а та-

кож місця зварних з'єднань з відповідним залишковим напружено-деформованим і структурним станом. Розвиток як чисельних методів прогнозування складних мультифізичних процесів в реальних матеріалах, так і високоефективних комп'ютерних засобів їх програмної реалізації суттєво розширили спектр практичних задач, що можуть бути розглянуті з мінімальною консервативністю. В рамках даної роботи проведено критичний огляд методів чисельного аналізу та прогнозування стану великогабаритних конструкцій зі структурно неоднорідних матеріалів.

Можна виділити три загальні підходи аналізу стану неоднорідних матеріалів та великогабаритних конструкцій з них – макроструктурний, мезоструктурний та мультимасштабний (рис. 1) [1].

Так, макроструктурний підхід передбачає однорідну інтерпретацію матеріалу, згідно з яким усі властивості визначаються явно та їм присвоюються певні ефективні значення для опису конкретних явищ. Найпростішим методом в такому випадку є викори-

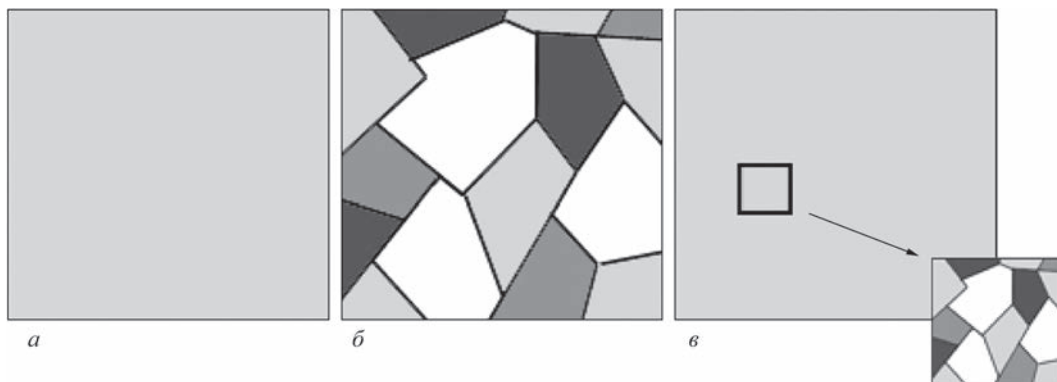


Рис. 1. Умовне представлення структурно неоднорідного матеріалу в моделях різного класу: *а* – макроструктурні (однорідний матеріал); *б* – мезоструктурні (неоднорідний матеріал); *в* – мультимасштабні (поетапний розгляд як однорідного, так і неоднорідного матеріала)

Міленін О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-9465-7710>

© О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, Н.І. Півторак, 2021

стання правила сумішей відповідно до парціально-го внеску кожної структурної складової [2] або формального усереднення вихідних властивостей, що може використовуватись, якщо характерний лінійний розмір досліджуваних фізичних полів значно перевищує масштаб неоднорідності матеріалу [3]. Подальше використання класичних методів, що базуються на загальних правилах будівельної механіки, дозволяє реалізувати відносно прості інженерні алгоритми, які дають загальне уявлення про несучу здатність конкретного конструкційного елемента за певної комбінації факторів зовнішнього впливу [4–6].

Для моделювання макродеформування конструкційних елементів з типових волокнистих або ортотропних двокомпонентних композиційних матеріалів, які мають виражену анізотропію властивостей, вони мають бути інтерпретовані як однорідні анізотропні [7]. Відомо, що в цьому випадку ефективні властивості усередненого матеріалу, зокрема, модуль Юнга  $E$ , коефіцієнт Пуассона  $\nu$  та модуль зсуву  $G$ , необхідно погоджувати з конкретними напрямками в залежності від просторового положення матеріалу згідно з правилом сумішей та, зокрема, моделлю Халпина-Цая [8]. При цьому властивості матеріалу в різних напрямках обчислюються наступним чином [9]:

$$E_1 = (1 - f) \cdot E_m + f \cdot E_f, \quad (1)$$

$$E_2 = E_3 = E_m \cdot \frac{(1 + \xi \cdot \eta \cdot f)}{(1 - \eta \cdot f)}, \quad (2)$$

$$G_{12} = G_{21} = G_{13} = G_{31} = G_m \cdot \frac{(1 + \xi \cdot \eta \cdot f)}{(1 - \eta \cdot f)}, \quad (3)$$

$$\nu_{12} = (1 - f) \cdot \nu_m + f \cdot \nu_f, \quad (4)$$

$$\nu_{23} = 1 - \nu_{12} - \frac{E_2}{3 \cdot K}, \quad (5)$$

де

$$\eta = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \xi} \quad \text{àà} \quad \eta = \frac{\frac{G_f}{G_m} - 1}{\frac{G_f}{G_m} + \xi}, \quad (6)$$

$$K = \left( \frac{f}{K_f} + \frac{1-f}{K_m} \right)^{-1}, \quad (7)$$

$$K_f = \frac{E_f}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu_f)}, \quad (8)$$

$$K_m = \frac{E_m}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu_m)}, \quad (9)$$

$\xi \approx 1$  – константа, індекси  $m, f$  відносять параметр, відповідно, до матеріалу матриці та наповнювача.

Пружне деформування матеріалу, тобто залежність механічних напружень  $\sigma_{ij}$  від деформацій  $\epsilon_{kl}$ , має наступний вигляд:

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl} \epsilon_{kl}, \quad (10)$$

де  $E_{ijkl}$  – матричне представлення пружних констант, що обчислюються згідно з (1)–(9).

Задача описання стану такого роду матеріалів ускладнюється при комбінації різнорідних шарів композитів в загальний ламінат. В рамках макроструктурного підходу такі випадки прийнято розглядати на основі класичної теорії шаруватих композитів (ламінітів), що дозволяє врахувати неоднорідність кожного шару при усередненні властивостей [10, 11]. Таке спрощення застосовується, зокрема, при інженерних розрахунках міцності та працездатності оболонкових елементів фіюзеляжів апаратів авіаційного та космічного призначення [12].

Активне використання скінченно-елементних методів (СЕМ) для моделювання стану матеріалів і конструкцій за різного зовнішнього впливу при проектуванні, аналізі фактичного стану з урахуванням результатів неруйнівного контролю, розробці нових матеріалів та оптимізації виробничих технологій зумовив подальший розвиток підходів інтерпретації неоднорідних властивостей реальних матеріалів і конструкцій. З одного боку, в рамках СЕМ алгоритми гомогенізації властивостей матеріалу знайшли своє природне продовження, тому що скінченно-елементне описання базується на припущенні однорідних властивостей матеріалу в рамках одного скінченного елемента, з іншого, вимагає формального узгодження між формуванням скінченно-елементного просторового розбиття та формулюванням фізичної моделі поведінки реального матеріалу.

Використання СЕМ для описання великогабаритних конструкцій стикається з природною складністю ресурсомісткості задач. Тому поряд із розробкою високоефективних розрахункових алгоритмів на сучасних комп'ютерних системах [13, 14] на сьогодні реалізовано низку спрощених одно- та двовимірних СЕМ, які дозволяють проводити необхідні чисельні дослідження без залучення значних обчислювальних потужностей. Зокрема, необхідно виділити балкові (так звані 2D-X) моделі, які поєднують засади балкових теорій та СЕМ [15], а також оболонкові СЕМ [16].

Окрім того, гнучкість скінченно-елементного розбиття для певних випадків дозволяє використовувати більш дрібну просторову дискретизацію біля потенційно небезпечних ділянок великогабаритних конструкцій (зварних з'єднань,

дефектів, виявлених інструментальними засобами дефектоскопії або постульованих), тоді як на периферії конструкції просторові кроки розбиття можуть бути значно більшими, що суттєво знижує ресурсомісткість задачі [17]. При цьому виникає природна проблема інтерпретації отримуваних результатів. Зокрема, в разі використання просторового розбиття мікронного розміру застосування загальних правил розрахунку напружено-деформованого стану суцільного середовища є некоректним, тому що формально в такому масштабі не виконуються вимоги до суцільності, однорідності та ізотропності матеріалу. Тому після виконання подібних розрахунків прийнято використовувати певні інтегральні методи (розрахунок J-інтегралу або інтегральних статистичних параметрів), які дозволяють отримати коректні експертні висновки щодо стану великогабаритної конструкції [18, 19].

Загальним недоліком макроструктурних підходів є суттєве спрощення поведінки матеріалів на нижчих масштабних рівнях, що суттєво обмежує їх застосовність. Зокрема, гомогенізація матеріалу та використання ефективних фізичних характеристик матеріалу не дозволяє врахувати особливості взаємодії різних структурних складників. Крім того, зародження та розвиток докритичного пошкодження матеріалу відбувається саме на мезо-, мікро- чи наномасштабних рівнях. Тому при використанні макроструктурних підходів в якості умов настання граничного стану не можуть бути безпосередньо без супутніх припущень використані критерії механіки руйнування. Стосовно структурно неоднорідних матеріалів при статичному силовому впливі існує низка критеріїв, заснованих на різних усереднених параметрах стану матеріалу, які мають бути визначені для кожного конкретного випадку. Так, заслуговує уваги критерій, що є модифікацією формули Хофмана для матеріалів при переважно розтягувальному зовнішньому зусиллі [20]:

$$\left(\frac{\sigma_{xx}}{X_{KM}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{xx}}{X_{KM}}\right)\left(\frac{\sigma_{yy}}{X_{KM}}\right) + \left(\frac{\sigma_{yy}}{Y_{KM}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{KM}}\right)^2 = 1, (11)$$

де  $X_{KM}$ ,  $Y_{KM}$ ,  $S_{KM}$  – умовні параметри міцності.

Альтернативні критерії граничного стану наведено, зокрема, в [21].

В рамках мезоструктурних підходів матеріал описується як неоднорідний, поєднуючи засади механіки суцільного середовища, пластичності, механіки руйнування та фізичного матеріалознавства. Відомо, що в мікрмасштабі втрата стабільності матеріалу відбувається в області мікроконцентраторів напружень і основним типом дефектності є дислокації кристалічної решітки [22, 23]. В свою чергу, при мезоструктурному описанні суцільність матеріалу втрачається

в окремих локалізованих областях матеріалу конструкції під зовнішнім навантаженням, руйнування розвивається вздовж максимальних дотичних напружень незалежно від орієнтації кристалічної решітки. Під макроруйнуванням в цьому випадку прийнято вважати появу глобальної втрати стабільності в області макроконцентратора напружень, відповідального за перехід несучільності матеріалу з мезорівня на макрорівень.

До основних задач мезоструктурних підходів відносяться [24–26]:

- прогнозування макроскопічних властивостей структурно неоднорідних матеріалів;
- дослідження нелінійної реакції неоднорідного матеріалу та конструкцій на зовнішній вплив;
- реалізація принципів механіки руйнування стосовно багатофазних матеріалів та конструкцій з них;
- аналіз розвитку динамічних процесів та розповсюдження хвиль стискання-розтягу;
- прогнозування поведінки спеціальних матеріалів за високих температур.

Більшість чисельних алгоритмів в рамках мезоструктурних підходів включають поняття репрезентативного об'ємного елемента (РОЕ), в рамках якого, власне, розглядається поведінка матеріалу конкретної конструкції [27–29]. Ключовою вимогою до РОЕ є його репрезентативність, тобто його поведінка в усередненому розумінні має представляти адекватне відображення реакції матеріалу на зовнішній вплив. Застосовність РОЕ конкретного розміру залежить від однорідності матеріалу та рівномірності фізичних полів. Особливий тип РОЕ – елементарні осередки, які формулюються на основі регулярності архітектури матеріалу, що може бути прямим геометричним описанням або певною ідеалізацією на основі певних статистичних ознак [30]. Це зумовлює об'єктивну складність його використання для прогнозування стану великогабаритних конструкцій. Тому стосовно задач визначення їх технічного стану мезоструктурний підхід використовується для аналізу окремих невеликих конструкційних елементів, місць підвищеної небезпеки руйнування або локальних експлуатаційних дефектів.

В мультимасштабних підходах використовуються як однорідний, так і неоднорідний опис матеріалу, а саме: на мезорівні як неоднорідний матеріал, властивості якого чітко визначені для кожного окремого компонента, на макрорівні – як однорідний, властивості якого не відображаються явно, але є ефективними властивостями через мезо-макророзв'язок (наприклад, врахування деформацій  $\epsilon$ , напружень  $\sigma$ , об'ємного докритичного пошкодження концентрації  $D$ , див. рис. 2) [31]. Це, з одного боку, дозволяє використовувати перева-

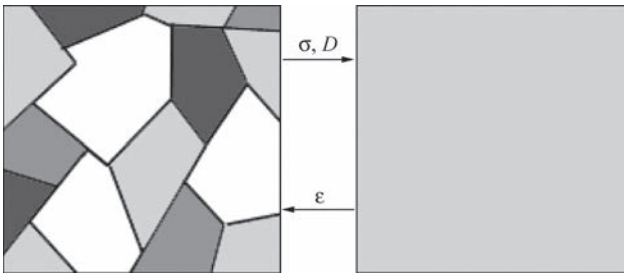


Рис. 2. Приклад мезо-макрозв'язків в мультимасштабних моделях [1]

ги мезоструктурних підходів та враховувати особливості структурного стану матеріалу, з іншого – прогнозувати певні макроскопічні реакції реальної конструкції на зовнішнє експлуатаційне навантаження, реалізуючи так звані мікроструктурно-чутливі моделі [32, 33].

Зокрема, характерним випадком є аналіз впливу технологічних параметрів монтажного зварювання на залишковий деформований стан великогабаритних конструкцій авіакосмічного призначення, в суднобудівній галузі, будівництві. Відомо, що зварювання є локальним процесом, що викликає суттєві структурні перетворення в металі шва та зоні термічного впливу, а також зумовлює формування певного залишкового напружено-деформованого стану (НДС), що, в свою чергу, впливає на загальне відхилення форми кінцевого виробу від проектної. Локальність кінетики температурних полів, фазових перетворень та формування НДС призводить до об'єктивних труднощів при моделюванні всієї конструкції. Тому раціональним є використання мультимасштабних моделей, які дозволяють розглядати процеси при зварюванні та загальне деформування великогабаритних конструкцій окремо. Тут можна видокремити методи, що базуються на теорії функції усадки [34], тобто результатом розрахунку локальних процесів при зварюванні є інтегральне значення зменшення об'єму металу в результаті його пластичного плину (усадки) та перенесення цього значення в якості мезо-макрозв'язку в макромодель, де величина усадки є параметром окремого скінченного елемента, розмір якого відповідає характерному розміру зварного шва. Такий підхід дозволяє не тільки спростити розрахунок НДС великогабаритних зварних конструкцій, врахувавши особливості зварювального процесу та його впливу на поточний стан матеріалу, але й реалізувати схеми для конструкційних елементів з великою кількістю зварних швів. Тому цей клас методів застосовується для аналізу стану площинних суднобудівних конструкцій та зварних підсиленних панелей в авіабудуванні [35, 36].

Використання мультимасштабних підходів найбільш поширене при описанні конструкційних елементів з композиційних матеріалів з регуляр-

ною структурою, де можливо реалізувати методи елементарних осередків. Зокрема, стосовно конструкцій волокнистих композитів можна виділити метод послідовного аналізу накопичення руйнування, запропонованого авторами [37], який дозволяє враховувати особливості пошкодження композиту при прогнозуванні настання граничного стану в сенсі макроруйнування.

Стосовно реальних полікристалічних матеріалів регулярність їх структури є достатньо умовною. Тому для опис процесів деформування та руйнування в рамках мультимасштабних підходів можлива реалізація статистичного аналізу, що враховує стохастичну нерегулярність структурного стану матеріалу, зокрема, певного докритичного пошкодження, яке може мати суттєвий вплив на стан конструкції. Так, Ешелбі в своїх роботах [38] запропонував порядок врахування докритичних неоднорідностей несучільності матеріалів в РОЕ при оцінці втомної міцності структурно неоднорідних конструкцій. Цю ідеологію було розвинуто в моделях кристалічної пластичності [39], методі Мура-Танакі [40] та теорії гомогенізації [41]. В роботі Макдауела пропонується замінити РОЕ на статистичні об'ємні елементи для аналізу багаточислової втоми, що дозволяє розглянути повний статистичний розподіл можливих відповідей матеріалу на зовнішній вплив [42].

Ці приклади демонструють, що в цілому мультимасштабні підходи є найбільш універсальними з точки зору застосовності для розв'язання типових задач аналізу стану реальних великогабаритних конструкцій, але вимагають достатньо ретельного обґрунтування зв'язків між мезо- та макроописанням матеріалу для гарантовано адекватних результатів прогнозування та відповідних експертних висновків.

## Висновки

1. Проведено огляд існуючих робіт по методах аналізу технічного стану великогабаритних конструкцій зі структурно неоднорідних матеріалів. Основну увагу приділено чисельним підходам, що передбачають скінченно-елементну (або аналогічну) реалізацію. В рамках умовного розділення на три класи – макроструктурні, мезоструктурні та мультимасштабні – показано основні переваги та недоліки характерних методів прогнозування процесів, що визначають якість та міцність типових конструкцій зі структурнонеоднорідних металів і композиційних матеріалів.

2. Розглянуто основні принципи інтерпретації просторово неоднорідних матеріалів в рамках макроструктурних підходів аналізу стану великогабаритних конструкцій. Наведено приклади алгоритмів розрахунку ефективних значень пружних

характеристик ортотропних композитів, що використовуються для розрахунків в рамках наближення однорідних анізотропних матеріалів.

3. Продемонстровано основні переваги мезоструктурних підходів, зокрема, можливості прогнозування ефективних макроскопічних властивостей структурно неоднорідних матеріалів і можливості аналізу докритичного руйнування матеріалу з урахуванням особливостей розподілу структурних компонентів. Зазначено їх обмежену застосовність для великогабаритних конструкцій через значну ресурсомісткість відповідних задач.

4. Показано, що мультимасштабні підходи є найбільш універсальними для аналізу стану реальних великогабаритних конструкцій, але для адекватних результатів прогнозування та відповідних експертних висновків вимагають обґрунтування зв'язків між мезо- та макроописанням матеріалу.

### Список літератури/References

1. Gitman, I.M. (2006) *Representative Volumes and Multi-scale Modelling of Quasi-brittle Materials*. Proefschrift. ter verkrijging van de graad van doctor aan de Technische Universiteit Delft.
2. Feng, B., Feng, X., Yan, C. et al. (2020) On the rule of mixtures for bimetal composites without bonding. *Journal of Magnesium and Alloys*, 8, 4, 1253–1261.
3. Aboudi, J., Arnold, S.M., Bednarczyk, B.A. (2013) *Micromechanics of Composite Materials. A Generalized Multiscale Analysis Approach*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
4. Moss, D.R., Basic, M. (2013) *Pressure Vessel Design Manual*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
5. Kollár, L.P., Springer, G.S. (2003) *Mechanics of composite structures*. Cambridge University Press.
6. Sayyad, A.S., Ghugal, Y.M. (2017) Bending, buckling and free vibration of laminated composite and sandwich beams: A critical review of literature. *Composite Structures*, 171, 486–504.
7. (1998) *Металлические конструкции. Т.1. Общая часть*. Кузнецов В.В. (ред.). Москва, Изд-во АСВ. (1998) *Metal structures. Vol.1: General*. Ed. by V.V. Kuznetsov. Moscow, ASV [in Russian].
8. Shokrieh, M.M., Moshrefzadeh-Sani, H. (2016) On the constant parameters of Halpin-Tsai equation. *Polymer*, 106, 14–20.
9. Fragoudakis, R. (2019) *Strengths and Limitations of Traditional Theoretical Approaches to FRP Laminate Design against Failure*. Engineering Failure Analysis. London: IntechOpen Limited.
10. Li S., E. Sitnikova, E. (2020) Representative volume elements and unit cells. Concepts, Theory, Applications and Implementation. Cambridge: Woodhead Publishing.
11. Haynes, R., Cline, J., Shonkwiler, B., Armano, E. (2016) On plane stress and plane strain in classical lamination theory. *Composites Science and Technology*, 127, 20–27.
12. Sofiyev, A.H. (2019) Influences of shear deformations and material gradient on the linear parametric instability of laminated orthotropic conical shells. *Composite Structures*, 225, 111–156.
13. Миленин А.С., Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф. и др. (2018) Высокопроизводительные методы численных исследований для решения задач экспертизы работоспособности дефектных конструкций. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 27–33. Milenin, A.S., Velikoivanenko, E.A., Rozynka, G.F., Pivtorak, N.I. et al. (2018) High-performance methods of numerical studies for solving the problems of evaluation of defective structure serviceability. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 1, 27–33 [in Russian].
14. Velikoivanenko, E., Milenin, A., Popov, A. et al. (2019) Methods of numerical forecasting of the working performance of welded structures on computers of hybrid architecture. *Cybernetics and Systems Analysis*, 55, 1, 117–127.
15. Махненко В.И., Миленин А.С., Семенов А.П. (2007) Математическое моделирование термомеханических процессов при сваркопайке стыковых соединений типа титан-алюминий. *Автоматическая сварка*, 11, 5–9. Makhnenko, V.I., Milenin, A.S., Semyonov, A.P. (2007) Mathematical modeling of thermal-deformation processes in braze-welding of butt joints of the titanium-aluminium type. *The Paton Welding J.*, 11, 2–6.
16. Trinh, M.-C., Jun, H. (2021) A higher-order quadrilateral shell finite element for geometrically nonlinear analysis. *European Journal of Mechanics – A/Solids*, 89, 104–283.
17. Perić, M., Seleš, K., Tonković, Z., Lovrenić-Jugović, M. (2019) Numerical simulation of welding distortions in large structures with a simplified engineering approach. *Open Phys*, 17, 719–730.
18. Kharchenko, V.V., Chirkov, A.Yu., Kobel'skii, S.V., Kravchenko, V.I. (2018) Peculiarities of the Fracture Strength Design of the Branch Pipe Zone of the Nuclear Reactor Vessel. *Strength of Materials*, 50, 517–528.
19. Milenin, A., Velikoivanenko, E., Rozynka, G., Pivtorak, N. (2019) Probabilistic procedure for numerical assessment of corroded pipeline strength and operability. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 171, 60–68.
20. Фудзии Т., Дзако М. (1982) *Механика разрушения композиционных материалов*. Москва, Мир. Fudzii, T., Dzako, M. (1982) *Fracture mechanics of composite materials*. Moscow, Mir [in Russian].
21. Гребенюк С.Н., Мелашенко О.П. (2012) Использование различных критериев прочности для расчёта волоконистых композитов. *Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил*, 3(32), 134–136.
21. Grebenyuk, S.N., Melashchenko, O.P. (2012) Application of different criteria of strength for calculation of fiber composites. *Zbirnyk Naukovykh Prats KhNUPS*, 3(32), 134–136 [in Russian].
22. Panin, V.E., Korotaev, A.D., Makarov, P.V., Kuznetsov, V.M. (1998) Physical mesomechanics of materials. *Russian Physics Journal*, 41(9), 856–884.
23. Haritos, G.K., Hager, J.W., Amos, A.K. et al. (1988) Mesomechanics: the microstructure mechanics connection. *Int. J. Solid Structures*, 24(11), 1081–1096.
24. Srivastava, V.K., Gabbert, U., Berger, H. (2011) Representative Volume Element Analysis for the Evaluation of Effective Material Properties of Fiber and Particle Loaded Composites with Different Shaped Inclusions. *Mechanics of Time-Dependent Materials and Processes in Conventional and Multifunctional Materials*, 3, 185–192.
25. Panin, V. (1998) Overview on mesomechanics of plastic deformation and fracture of solids. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 30(1), 1–11.
26. Saksala, T. (2018) Numerical modelling of concrete fracture processes under dynamic loading: Meso-mechanical approach based on embedded discontinuity finite elements. *Engineering Fracture Mechanics*, 201, 282–297.
27. Kanit, T., Forest, S., Galliet, I. et al. (2003) Determination of the size of the representative volume element for random composites: statistical and numerical approach. *International Journal of Solids and Structures*, 40, 3647–3679.
28. Ostoja-Starzewski, M. (2006) Material spatial randomness: From statistical to representative volume element. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 21, 112–132.
29. Bargmann, S., Klusemann, B., Markmann, J. et al. (2018) Generation of 3D representative volume elements for heterogeneous materials: A review. *Progress in Materials Science*, 96, 322–384.
30. Schmauder, S., Mishnaevsky, L.Jr. (2009) *Micromechanics and Nanosimulation of Metals and Composites*. Berlin: Springer-Verlag.

31. McDowell, D.L. (2008) Viscoplasticity of heterogeneous metallic materials. *Materials Science and Engineering R.*, **62**, 67–123.

32. McDowell, D.L. (2007) Simulation-based strategies for microstructure-sensitive fatigue modeling. *Ibid.*, **468**, 4–14.

33. Wilson, D., Dunne, F.P.E. (2019) A mechanistic modelling methodology for microstructure-sensitive fatigue crack growth. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **124**, 827–848.

34. Махненко О.В., Мужиченко А.Ф., Зайффарт П. (2009) Применение математического моделирования при термической правке судостроительных панелей. *Автоматическая сварка*, **1**, 10–16.

Makhnenko, O.V., Muzhichenko, A.F., Seyffardt, P. (2009) Application of mathematical modeling in thermal straightening of shipbuilding panels. *The Paton Welding J.*, **1**, 10–16.

35. Махненко О.В., Зайффарт П. (2008) Расчетное прогнозирование общих деформаций сварных балок при лазерной сварке. *Там же*, **3**, 14–20.

Makhnenko, O.V., Seyffardt, P. (2008) Calculation prediction of overall distortions in laser welded beams. *Ibid.*, **3**, 6–12.

36. Махненко О.В., Мужиченко А.Ф., Прудкий И.И. (2013) Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния сварных стрингерных панелей из титанового сплава VT20. *Там же*, **2**, 14–20.

Makhnenko, O.V., Muzhichenko, A.F., Prudky, I.I. (2013) Mathematical modeling of stress-strain state of welded stringer panels from titanium alloy VT20. *Ibid.*, **2**, 13–9.

37. Великоиваненко Е.А., Миленин А.С., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. (2016) Численное прогнозирование эффективности усиления дефектных трубопроводов бандажами из композиционных материалов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 12–18.

Velikoivanenko, E.A., Milenin, A.S., Rozyinka, G.F., Pivtorak, N.I. (2016) Numerical prediction of effectiveness of reinforcement of defective pipelines by composite material bands. *Tekh. Diagnost i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 24–31 [in Russian].

38. (2006) Collected Works of J. D. Eshelby: *The Mechanics of Defects and Inhomogeneities (Solid Mechanics and Its Applications)*. Edit: X. Markenscoff, A. Gupta. Springer Netherlands.

39. Dormieux, L., Kondo, D. (2016) *Micromechanics of Fracture and Damage*. Vol. 1. London, ISTE Ltd.

40. Xiaotao, L., Shan, L. (2021) A micro-crack initiation life simulation method by improving the Tanaka-Mura's model of slip behavior. *International Journal of Fatigue*, **145**, 106–108.

41. Cioranescu, D., Damlamian, A., Griso, G. (2002) Periodic unfolding and homogenization, *C.R. Acad. Sci. Paris. Ser.*, **1(335)**, 99–104.

42. McDowell, D.L., Gall, K., Horstemeyer, M.F., Fan J. (2003) Microstructure-based fatigue modeling of cast A356-T6 alloy. *Engineering Fracture Mechanics*, **70**, 49–80.

## FINITE ELEMENT METHODS FOR ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF LARGE-SIZED STRUCTURES FROM STRUCTURALLY HETEROGENEOUS MATERIALS (Review)

O.S. Milenin, O.A. Velikoivanenko, G.P. Rozyinka, N.I. Pivtorak

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: asmilenin@ukr.net

Critical analysis of literature data on the methods of numerical analysis of the technical condition of large-sized structures from structurally heterogeneous materials was performed. The main advantages and disadvantages of their application for prediction of the processes, determining the quality and strength of typical structures from structurally-heterogeneous metals and composite materials, are shown within the framework of conditional division of these methods into three classes, namely macrostructural, mezostructural and multiscale. 42 Ref., 2 Fig.

*Keywords:* large-sized structures, heterogeneous materials, composite materials, technical condition, finite-element modeling, welded joints

Надійшла до редакції 07.05.2021

## КОМПОЗИЦІЇ НА ОСНОВІ МАГНІТНИХ НАНОЧАСТИНОК ДЛЯ НЕРУЙНІВНОЇ МАГНІТНОЇ ДЕФЕКТΟΣКОПІЇ

**Призначення:** проведення неруйнівної дефектоскопії виробів з магнітних матеріалів із використанням композицій на основі магнітних наночастинок, а також одержання стійкого зображення дефекту завдяки створенню репліки при затвердінні композиції.

**Область застосування:** дефектоскопія виробів з магнітних матеріалів – сталі, заліза, чавуну.

### Основні технічні характеристики та переваги:

Розмір дефектів, які можна виявити	1,2 мкм і більше
Виявлення скритих дефектів, що не виходять на поверхню	до 3 мм під поверхню
Висока контрастність зображення дефекту	так
Можливість фіксації зображення дефекту при затвердінні репліки	так
Низька вартість композиції	так
Відсутність потреби в спеціальному обладнанні	так



Інститут фізичної хімії  
ім. Л.В. Писаржевського НАН України