

МОДЕЛІ МАШИННОГО ТА ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ПЕРЕДБАЧЕННЯ ВНУТРІШНІХ НАПРУЖЕНЬ

О.Е. Пономарьов¹

¹ аспірант кафедри ММІ, НТУ «ХПІ», Харків, Україна
Oleh.Ponomarov@infiz.khpi.edu.ua

У сучасному чисельному моделюванні все частіше замість класичного методу скінченних елементів (МСЕ) застосовують моделі машинного та глибокого навчання. Такі моделі здатні прогнозувати розподіл внутрішніх напружень на основі геометрії, матеріальних параметрів і навантажень, не виконуючи повного розв'язання системи рівнянь пружності. Це дозволяє суттєво скоротити час обчислень і відкриває можливості інтерактивного застосування, зокрема у системах доповненої реальності.

Одним із найефективніших напрямів є операторне навчання, зокрема модель Fourier Neural Operator (FNO), яка вивчає залежність між полем вхідних параметрів і полем напружень. Вона забезпечує високу точність і прискорення обчислень у порівнянні з традиційними методами [1]. Модифікація Geo-FNO дозволяє застосовувати цей підхід до складних геометрій, представлених у вигляді сіток або хмар точок, що робить його універсальним інструментом для інженерних задач.

Інший поширений підхід — графові нейронні мережі (GNN), які працюють безпосередньо зі структурою сітки об'єкта. Вони ефективно відтворюють поля напружень і деформацій у матеріалах зі складною мікроструктурою та демонструють гарну узагальнюваність між різними геометріями [2, 3].

Для випадків з обмеженою кількістю даних застосовують physics-informed моделі (PINN, PeFNO), що інтегрують у функцію втрат рівняння рівноваги та граничні умови. Це дає змогу моделі залишатися фізично узгодженою навіть без великого обсягу навчальних прикладів [4].

Вибір методу залежить від поставленої задачі. Якщо доступна велика база симуляцій і модель застосовується до обмеженої кількості геометрій, доцільно використовувати GNN. У випадку, коли необхідно узагальнювати на нові геометрії або навантаження, ефективним є операторне навчання. Якщо ж даних мало або важлива суворота фізична коректність, оптимальним вибором буде PINN.

Таким чином, моделі машинного та глибокого навчання стають перспективною альтернативою МСЕ, особливо у задачах, де критичними є швидкість, узагальнюваність і можливість інтерактивного використання.

Список літератури:

1. Li Z., Huang D. Z., Liu B., Anandkumar A. Fourier Neural Operator with Learned Deformations for PDEs on General Geometries // Journal of Machine Learning Research. – 2023. – Vol. 24. – P. 1–26
2. Pagan D. C., Pash C. R., Benson A. R., Kasemer M. P. Graph neural network modeling of grain-scale anisotropic elastic behavior using simulated and measured microscale data // npj Computational Materials. – 2022. – Vol. 8. – Article 259.
3. Storm J., Rocha I. B. C. M., van der Meer F. P. A microstructure-based graph neural network for accelerating multiscale simulations // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2024. – Vol. 427. – Article 117001.
4. Khorrami M. S., Goyal P., Mianroodi J. R., Svendsen B., Benner P., Raabe D. A physics-encoded Fourier neural operator approach for surrogate modeling of divergence-free stress fields in solids // SSRN Electronic Journal. – 2025. – Preprint № 5397464.