

МУЛЬТИМАСШТАБНА МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОЇ ОЦІНКИ ПОШКОДЖЕНОСТІ ТА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ З ВОЛОКНИСТИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

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

Розроблено мультимасштабну методику прогнозування напружено-деформованого, пошкодженого та граничного станів конструкцій з типових волокнистих композиційних матеріалів. В основу методології покладено комбінацію макромасштабних моделей описання стану структурно неоднорідних крихких матеріалів та мезомасштабні підходи континуального моделювання розвитку пошкодженості під дією зовнішнього навантаження. На прикладі великогабаритних циліндричних посудин тиску зі скло- та вуглеволоконних композитів досліджено особливості впливу зовнішнього навантаження на пошкодженість матеріалу та граничний стан конструкції. Бібліогр. 11, рис. 5.

Ключові слова: композиційні матеріали, пошкодженість, граничний стан, математичне моделювання, мультимасштабна методика

Використання композиційних матеріалів при виготовленні конструкцій для потреб аерокосмічної галузі, автомобілебудування, будівництва є ефективним шляхом отримання конструкційних елементів з унікальними комбінаціями експлуатаційних властивостей. Зокрема, поширення отримали волокнисті композити на основі скляних та вуглецевих волокон, які дозволяють досягти високої міцності тонкостінних конструкцій при їх відносно невеликій вазі [1–3]. Але просторова неоднорідність структури таких матеріалів зумовлює об'єктивні труднощі при проектуванні, експертизі технічного стану та аналізі працездатності реальних конструкційних елементів, зокрема, великогабаритних. Використання загальноприйнятих підходів, які полягають в оцінці ефективних властивостей матеріалу для подальшого розгляду його як однорідного, суттєво обмежує коло розв'язуваних практично значимих задач. Зокрема, відомо, що процес зародження та розвитку дефектності матеріалу є мікроскопічним за своїм масштабом, тому для коректної оцінки ступеня пошкодженості та врахування докритичної пошкодженості при оцінці граничного стану конструкції під дією проектного навантаження необхідно враховувати особливості структури матеріалу та його опірність певному механізму руйнування [4].

Можливості чисельного опису композиційних конструкцій в неоднорідній постановці обмежені ресурсомісткістю відповідних задач, тому розробка аналітичних підходів, що дозволяють, з одного боку, врахувати особливості мікроструктурного стану матеріалу при моделюванні, а з іншого – розглядати конкретні конструкційні елементи без суттєвого спрощення, є актуальною. Тут доцільно відокремити методи мультимасштабного

моделювання, що базуються на сучасних алгоритмах скінченно-елементного моделювання складних різномасштабних процесів [5, 6]. Метою цієї роботи є розробка методології та чисельних засобів мультимасштабного прогнозування напружено-деформованого, пошкодженого та граничного станів конструкцій з типових волокнистих композиційних матеріалів.

Основною ідеєю розробленої методології є послідовна скінченно-елементна реалізація простеження стану конструкції загалом в однорідному анізотропному наближенні (макромасштаб) та окремо кожної регулярної мезомасштабної області в неоднорідному наближенні (мезомасштаб). Це дозволяє уникнути надмірних вимог до ресурсів засобів обчислення шляхом збільшення швидкості окремого розрахунку. При цьому незалежність розрахунків станів окремих мезомасштабних областей надає широкі можливості до використання алгоритмів паралельного обчислення відповідних крайових задач з метою суттєвого зменшення часу проведення чисельних експериментів [7]. Зв'язок між рівнями реалізується шляхом передачі певного обсягу розрахункових даних, а саме деформованого стану та докритичного пошкодження (рис. 1).

Для комп'ютерної реалізації даного підходу використовувались методи скінченно-елементного моделювання на основі восьмивузлових елементів, а кожний скінченний елемент макрозадачі розглядався як регулярна мезообласть, в рамках якої ставилась відповідна мезозадача.

Так, макромасштабне наближення вимагає використання усереднених фізико-механічних властивостей матеріалу в залежності від складу двокомпонентного композиту (об'ємного вмісту

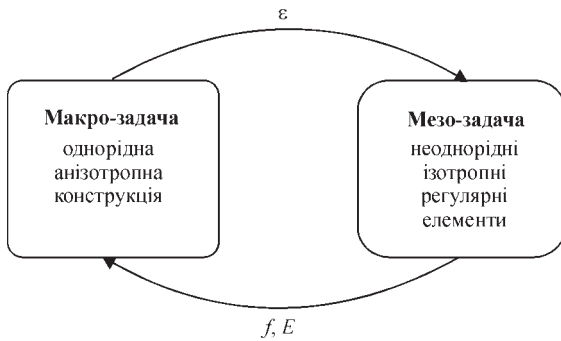


Рис. 1. Умовна схема постановки мультимасштабної задачі опису напружено-деформованого та пошкодженого стану конструкцій з композиційних матеріалів для розв'язання характерних задач експертизи технічного стану

матеріалу матриці V_m і волокнистого наповнювача V_f) та властивостей його окремих складників. Тут найбільш поширеними є підходи, що базуються на правилі сумішей. Зокрема, для випадку в макромасштабі композиційний матеріал розглядається, як пружний ортотропний, а значення модуля Юнга вздовж і упоперек волокон обчислюється згідно з правилом сумішей [8]:

$$\begin{cases} E_T = \frac{E_f E_m}{E_m V_f + E_f (1 - V_f)}; \\ E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f), \end{cases} \quad (1)$$

де E_m, E_f – модуль Юнга матеріалу матриці та волокон відповідно; E_T, E_L – модуль Юнга умовно однорідного анізотропного композиту вздовж і упоперек волокон відповідно.

Для визначення коефіцієнта Пуассона було використано залежність Уїтні та Райлі в наступному формулюванні [9]:

$$\begin{cases} \nu_{LT} = \frac{\nu_m - [2(\nu_m - \nu_f)(1 - \nu_m^2)E_f V_f]}{E_m (1 - V_f)(1 - \nu_f - 2\nu_f^2) + E_f [V_f (1 - \nu_m - 2\nu_m^2) + (1 + \nu_m)]}, \\ \nu_{TL} = \nu_m V_m + \nu_f V_f, \end{cases} \quad (2)$$

де ν_{LT}, ν_{TL} – коефіцієнт Пуассона для напрямків вздовж і упоперек волокна відповідно; ν_m, ν_f – коефіцієнт Пуассона матеріалу матриці та волокон відповідно.

Граничний стан в конкретному скінченному елементі макрозадачі досягається при несприятливій комбінації повздовжніх (відносно напрямку волокон) σ_{xx} , поперечних σ_{yy} та дотичних напружень σ_{xy} , що математично визначається, зокрема, на основі формули Хофмана [10]:

$$\left(\frac{\sigma_{xx}}{X_1}\right)^2 - \frac{\sigma_{xx}\sigma_{yy}}{X_1 X_2} + \left(\frac{\sigma_{yy}}{X_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S}\right)^2 > 1, \quad (3)$$

де X_1, X_2, S – константи матеріалу.

В разі, якщо вісі ортотропного композиту не співпадають з напрямком силового навантаження, константи в (3) можуть бути розраховані наступним чином:

$$X_1 = X_s \sin^2 \alpha + X_m \cos^2 \alpha;$$

$$X_2 = X_m \sin^2 \alpha + X_s \cos^2 \alpha, \quad (4)$$

де α – кут між вектором прикладення зусилля та напрямком розташування волокон, X_m, X_s – константи матеріалу, що характеризують граничний стан матеріалу при навантаженні впоперек та вздовж волокон відповідно.

Результатом скінченно-елементного розв'язання крайової задачі напружено-деформованого стану (НДС) конкретної конструкції з композиційного матеріалу певного класу є поле деформацій, яке використовується при аналізі мезостану кожного елемента в якості граничних умов. Шляхом розрахунку мезозадачі оцінюється докритична пошкодженість матеріалу, яка впливає на макроскопічний НДС, що формально враховується передачею величини об'ємної концентрації пошкодження в макрозадачу.

Відомо, що особливістю руйнування композиційних матеріалів є значна дисперсія граничного навантаження, яка зумовлена локальною неоднорідністю властивостей, природним відхиленням структури від ідеальної, набутою під час виготовлення пошкодженістю тощо. Тому для описання розвитку докритичного пошкодження в матриці композиту використовувався статистичний підхід, що базується на функції розподілу Вейбула:

$$df = \begin{cases} A f_0 \varepsilon_{\max}^{\eta-1} \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_0}\right)^\eta\right] d\varepsilon_{\max}, & \varepsilon_{\max} \geq 0; \\ 0, & \varepsilon_{\max} < 0, \end{cases} \quad (5)$$

де df – приріст об'ємної концентрації пошкодження матриці композиту; ε_{\max} – максимальна локальна деформація; $A = \frac{\eta}{\varepsilon_0^\eta}$, η, ε_0, f_0 – константи.

В разі, якщо для певного скінченного елемента об'ємна концентрація пошкодження f перевищує певне критичне значення f_{cr} , вважалось, що цей елемент втрачає свою несучу здатність.

Таким чином, з мезомасштабної задачі в макромасштабну передається значення сумарної пошкодженості F :

$$F = \frac{\sum f + n_{st}}{N}, \quad (6)$$

де n_{st} – сумарна кількість елементів, що втрачають несучу здатність; N – кількість елементів розбиття мезообласті; \sum_N – оператор суми по всіх скінченних елементах розбиття мезообласті.

Це кількісне значення F використовується для коригування модулів Юнга в макрозадачі згідно з наступним співвідношенням:

$$E^f = \frac{E}{1 - F}. \quad (7)$$

Крім того, зародження та розвиток докритичного пошкодження зумовлює додаткову складову тензора деформацій, а саме:

$$\varepsilon^f = \Delta F/3, \quad (8)$$

де ΔF – приріст F на кожному кроці механічного навантаження.

Тензори механічних напружень σ_{ij} і пружних деформацій ε_{ij} пов'язані між собою узагальненим законом Гука, тобто:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{1}{E_x} \sigma_{xx} - \frac{\nu_{xy}}{E_y} \sigma_{yy} + \frac{\Delta F}{3}; \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{1}{E_y} \sigma_{yy} - \frac{\nu_{xy}}{E_x} \sigma_{xx} + \frac{\Delta F}{3}; \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{G_{xy}} \sigma_{xy}. \end{aligned} \quad (9)$$

Запропонований алгоритм включає низку констант матеріалу, що мають бути визначеними на основі результатів відповідних лабораторних випробувань. Для цього в даній роботі було використано літературні дані експериментальних досліджень граничного навантаження скловолоконних та вуглеволоконних композитів ($V_m = V_f = 0,5$ для обох випадків, матриця – епоксидна смола) з різним напрямком розташування армуючих волокон. На основі обробки цих даних було отримано константи матеріалів, а саме:

- скловолоконний композит: $\eta = 3,2$; $\varepsilon_0 = 0,01$; $f_0 = 10^{-5}$; $X_m = 35$ МПа; $X_s = 350$ МПа; $S = 18$ МПа; $f_{cr} = 0,15$; $E_m = 2$ ГПа; $E_f = 70$ МПа;
- вуглеволоконний композит: $\eta = 4,6$; $\varepsilon_0 = 0,007$; $f_0 = 10^{-5}$; $X_m = 50,2$ МПа; $X_s = 1300$ МПа; $S = 20$ МПа; $f_{cr} = 0,20$; $E_m = 2$ МПа; $E_f = 280$ ГПа.

Розрахунок було проведено на базі скінченно-елементного розв'язання мультифізичної задачі відповідно до наведеної вище постановки, для макрозадачі було використано восьмивузлові еле-

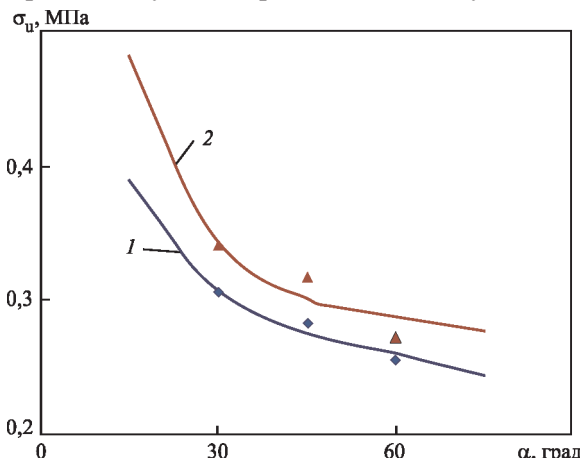


Рис. 2. Залежності напруження руйнування σ_u зразків з волоконного композиційного матеріалу від кута прикладання сили відносно напрямку волокон α у порівнянні з результатами лабораторних випробувань [11]

Примітка. Тут і на рис. 3-5: 1 – скловолоконний композит; 2 – вуглеволоконний композит

менти з лінійним розміром 0,5 мм, що достатньо деталізує просторово різномірний НДС матеріалу. Детально програмні алгоритми розв'язання наведено, зокрема, в [7].

На рис. 2 показано результати порівняння розрахункових значень граничного навантаження зразків з експериментальними [11]. З цих даних видно в цілому задовільну точність результатів прогнозування граничного стану вказаних матеріалів на основі запропонованої моделі.

Однією з переваг розробленого підходу є можливість чисельного простеження розвитку докритичного пошкодження окремих складників композита та врахування впливу характеру їх мезомасштабної взаємодії на граничний стан зразків чи великогабаритних конструкцій. Так, на рис. 3 показано кінетику накопичення докритичного пошкодження f композиційних зразків при навантаженні до граничного стану. Нелінійність розвитку об'ємної концентрації несутцільності в перерізі як скло-, так і вуглеволоконного зразка викликана, з одного боку, поступовим послабленням матеріалу, з іншого, додатковим деформуванням матеріалу в результаті появи та зростання розподілених порожнин.

Важливим фактором при аналізі технічного стану композиційних конструкцій є оцінка впли-

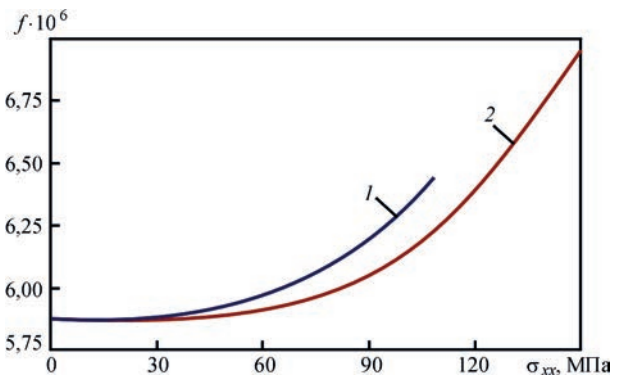


Рис. 3. Кінетика накопичення об'ємної концентрації f докритичного пошкодження композиційного зразка під дією розтягувального навантаження σ_{xx} до граничного стану

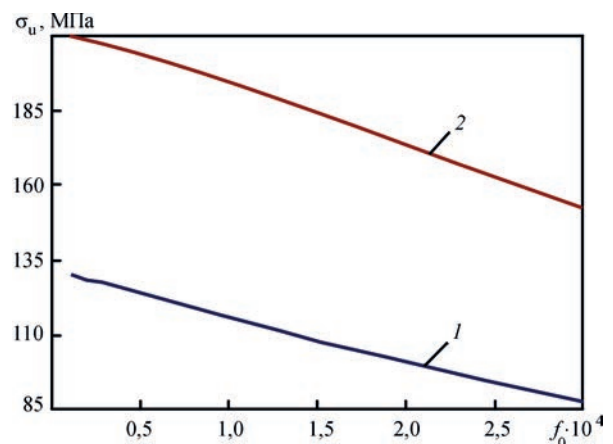


Рис. 4. Залежність граничної міцності σ_u волоконного композиційного зразка ($V_f = V_m = 0,5$, $\alpha = 45^\circ$) від початкової об'ємної концентрації докритичного пошкодження матеріалу f_0

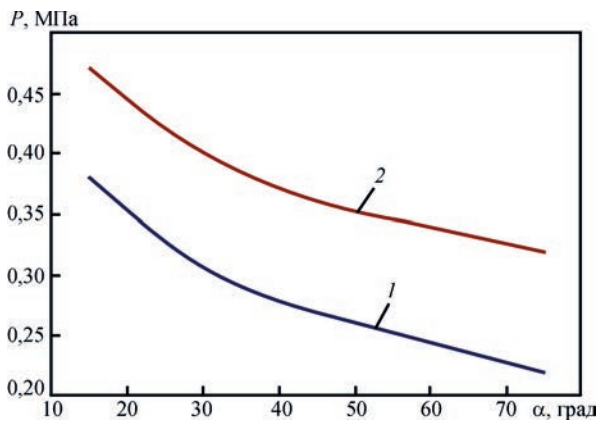


Рис. 5. Залежність граничного тиску P в циліндричній посудині (діаметр $D = 1200$ мм, товщина стінки $t = 3$ мм) з композиційного матеріалу від кута волокон α відносно вісі конструкції

ву набутої при виготовленні чи довготривалій експлуатації пошкодженості матеріалу. В рамках запропонованої методології початковий пошкоджений стан матеріалу характеризується константою f_0 з (5). На рис. 4 показано вплив конкретного значення f_0 на величину граничного навантаження зразка з композиційного матеріалу. Вона є квазілінійною, що обумовлено відносно невеликим впливом пошкодження на деформований стан на початку навантаження та пружного деформування, тому це компонент є адитивним.

Стосовно моделювання стану великогабаритних конструкцій, було розглянуто циліндричну посудину тиску діаметром $D = 1200$ мм, товщиною стінки $t = 3$ мм під дією внутрішнього тиску. Характерною особливістю при цьому є виражена двовісність напруженого стану конструкції в окружному та осьовому напрямках. Це не суттєво змінює якісний вигляд залежності граничного тиску в конструкції від кута розташування волокон відносно вісі посудини тиску (рис. 5) в порівнянні з результатами досліджень руйнування зразків при одновісному розтягненні (див. рис. 2), але змінює відповідні кількісні показники.

Висновки

1. Розроблено та програмно реалізовано методологію мультимасштабного прогнозування напружено-деформованого, пошкодженого та граничного станів конструкцій з типових волокнистих композиційних матеріалів. В основу запропонованого підходу покладено скінченно-елементну реалізацію простеження стану конструкції загалом в однорідному анізотропному наближенні (макрмасштаб) та окремо кожної регулярної мезомасштабної області в неоднорідному наближенні (мезомасштаб). Порівняння результатів прогнозування граничного стану зразків зі скловолоконного та вуглеволоконного композитів із наявними літературними даними показало задовільну точність розробленого підходу.

2. Досліджено особливості докритичного руйнування волокнистого матеріалу при одновісному навантаженні стандартних зразків. Показано характерну нелінійність розвитку об'ємної концентрації несучільності в перерізі композиційного зразка, яка зумовлена поступовим послабленням та додатковим деформуванням матеріалу в результаті появи та зростання розподілених порожнин. Продемонстровано вплив початкового пошкодженого стану матеріалу на його несучу здатність як приклад застосування розробленого підходу для оцінки технічного стану конструкцій та компонентів з волоконних композитів.

3. На прикладі циліндричної посудини тиску показано особливості впливу двовісності напруженого стану на граничне навантаження конструкції, зокрема, при зміні орієнтації волокон відносно її вісі, в порівнянні з аналогічними залежностями, отриманими для стандартних випробувальних зразків.

Список літератури/References

1. Kiruthika, A.V. (2017) A review on physico-mechanical properties of bast fibre reinforced polymer composites. *Journal of Building Engineering*, **9**, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.12.003>
2. Yao, S.-S., Jin, F.-L., Rhee, K.Y. et al. (2018) Recent advances in carbon-fiber-reinforced thermoplastic composites: A review. *Composites Part B: Engineering*, **142**, 241–250. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.007>
3. Böer, P., Holliday, L., Kang, T.H.-K. (2013) Independent environmental effects on durability of fibre-reinforced polymer wraps in civil applications: A review. *Construction and Building Materials*, **48**, 360–370. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.077>
4. Kortschot, M.T., Beaumont, P.W.R. (1990) Damage mechanics of composite materials: I – Measurements of damage and strength. *Composites Science and Technology*, **39**, 4, 289–301. [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(90\)90077-1](https://doi.org/10.1016/0266-3538(90)90077-1)
5. Міленін О.С., Великоіваненко О.А., Розинка Г.П., Півторак Н.І. (2021) Скінченно-елементні методи оцінки технічного стану великогабаритних конструкцій зі структурно неоднорідних матеріалів (Огляд). *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*, **2**, 14–19. <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.02.02>
5. Міленін, О.С., Великоіваненко, О.А., Розинка, Г.П., Півторак, Н.І. (2021) Finite elements methods for assessment of the technical condition of large-sized structures from structurally heterogeneous materials (Review). *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **2**, 14–19 [in Russian] <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.02.02>
6. 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. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.02.003>
7. Velikoivanenko, E.A., Milenin, A.S., Popov, A.V. 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. <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00117-8>
8. Abdel Ghafaar, M., Mazen, A.A. (2006) Application of the rule of mixtures and Halpin-Tsai equations to woven fabric reinforced epoxy composites. *Journal of Engineering Sciences*, **34**, **1**, 227–236. <https://doi.org/10.21608/jesaun.2006.110251>
9. Buragohain, M.K. (2017) *Micromechanics of a Lamina. Composite Structures. Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing*. USA CRC Press.
10. Nyambeni, N., Mabuza, B.R. (2018) Considerations of Failure Analysis in a Multi-Layered Composite Structure

- under Thermomechanical Loading. *Proceedings*, 2, 8, 447. <https://doi.org/10.3390/ICEM18-05329>
11. Naresh, K., Shankar, K., Velmurugan, R. (2018) Reliability analysis of tensile strengths using Weibull distribution in

glass/epoxy and carbon/epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, 133, 129–144. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.002>

MULTISCALE PROCEDURE OF NUMERICAL ASSESSMENT OF DAMAGE RATE AND TECHNICAL STATE OF STRUCTURES FROM FIBROUS MATERIALS

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

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

A multiscale procedure was developed for prediction of stress-strain, damaged and boundary states of structures from typical fibrous composite materials. The methodology is based on a combination of macroscale models for describing the state of structurally inhomogeneous brittle materials and mesoscale approaches of continuous modeling of damage development under the impact of external loading. The features of the impact of external loading on material damage level and boundary state of structures were studied in the case of large-sized cylindrical pressure vessels from glass and carbon fibre-reinforced composites. Ref. 11, Fig. 5.

Keywords: composite materials, damage rate, boundary state, mathematical modeling, multiscale procedure

Надійшла до редакції 13.09.2021

Данина пам'яті

4 жовтня 2021 р. у Києві на фасаді Головного корпусу Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України встановлено оновлену меморіальну дошку видатному інженеру, вченому в галузі мостобудування та електрозварювання, академіку, віце-президенту Академії наук УРСР, заслуженому діячеві науки УРСР, педагогу, організатору науки та виробництва, громадському діячеві – Євгену Оскаровичу Патону.

Є.О. Патон був фундатором нового наукового напрямку – електрозварювання і ініціатором широкого впровадження його у зварювальне виробництво. За його ініціативи 1 січня 1934 р. засновано перший в світі спеціалізований науковий зварювальний центр – Інститут електрозварювання, директором якого він був до кінця життя – 12 серпня 1953 р.

Ідею Є.О. Патона щодо «зустрічі електрозварювання з мостобудуванням», вдало відобразив автор меморіальної дошки – відомий скульптор С.С. Беляєв, який багато років співпрацює з Інститутом електрозварювання. На меморіальній дошці погляд видатного мостобудівника, всесвітньо відомого вченого в галузі електрозварювання, академіка Є.О. Патона спрямований на своє унікальне творіння – перший в Європі суцільнозварний міст через Дніпро. Обличчя Євгена Оскаровича передає його внутрішню сутність – мудрість, цілеспрямованість та оптимістичний погляд у майбутнє.

Діяльність Євгена Оскаровича Патона – вченого і талановитого інженера, організатора науки і виробництва, назавжди залишиться в історії світової науки і техніки.

Редакція журналу

