УДК 692.23:624.014

А. Р. Козуб
І. В. Коц

ПРОБЛЕМИ ТА ПІДХОДИ ДО ЗВ'ЯЗАНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ Й ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ У ВУЗЛАХ ТРИШАРОВИХ СЕНДВІЧ-ПАНЕЛЕЙ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Проаналізовано чинну нормативну базу щодо проєктування та розрахунку огороджувальних конструкцій із тришарових сендвіч-панелей. Виявлено основні проблеми експлуатаційної надійності їхніх вузлових з'єднань, зумовлені ізольованим оцінюванням механічних і теплотехнічних процесів.

Сформульовано наукову гіпотезу про взаємозв'язок між температурним жолобленням обкладок, розкриттям замкових стиків та інтенсифікацією конвективного вологопереносу. Для подальших досліджень запропоновано концептуальну схему зв'язаного математичного та комп'ютерного моделювання, спрямовану на прогнозування поведінки цих конструкцій за кліматичних впливів.

Ключові слова: сендвіч-панелі, вузлові з'єднання, кліматичні впливи, термомеханічне деформування, тепломасоперенос, зв'язане моделювання, містки холоду, точка роси.

Abstract

This paper analyzes the current regulatory framework for the design and calculation of building envelopes made of three-layer sandwich panels. It identifies the main issues regarding the operational reliability of their joint connections, which stem from the isolated assessment of mechanical and thermal processes.

A scientific hypothesis has been formulated regarding the interrelationship between thermal bowing of the cladding, the opening of interlocking joints, and the intensification of convective moisture transfer. For further research, a conceptual scheme of coupled mathematical and computational modeling is proposed, aimed at predicting the behavior of these structures under climatic influences.

Keywords: sandwich panels, joint connections, climatic influences, thermomechanical deformation, heat and mass transfer, coupled modeling, thermal bridges, dew point.

Вступ

Сучасне будівництво активно використовує огороджувальні конструкції на основі тришарових металевих сендвіч-панелей із поліізоціануратним та мінераловатним утеплювачем. Перехід від типових прямокутних споруд до будівель складної архітектурної конфігурації суттєво підвищує вимоги до конструктивної надійності вузлових з'єднань. В умовах експлуатації зовнішня металева обкладка під дією сонячної радіації влітку може нагріватися до +80 °С, тоді як узимку температура знижується до - 20 °С і нижче. Високий температурний градієнт між обкладками провокує нелінійне температурне жолоблення панелей, концентрацію напружень у зонах кріплень, розкриття замкових з'єднань і втрату герметичності стиків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Нормування та розрахунок тришарових конструкцій регламентується низкою національних та міжнародних стандартів. Зокрема, технічні умови [1] встановлюють загальні вимоги до проєктування та визначення несучої здатності самонесних панелей, а державні норми [2] і стандарти моделювання [3, 4] описують методи розрахунку теплових містків і оцінки ризику внутрішньої конденсації. У науковій літературі детально досліджено окремі аспекти механічної поведінки тришарових систем за температурних дій і складних умов опирання [5], а також моделювання вузлів кріплення [6]. У недавньому дослідженні [7] оцінено теплоізоляційну здатність і цілісність покрівельних стиків панелей із PIR-наповнювачем за короткочасного високотемпературного впливу та фіксованих зазорів, однак тривале циклічне кліматичне деформування й конвективний масоперенос не розглядалися.

Проте аналіз чинної нормативно-методичної бази свідчить про суттєву прогалину: механічний розрахунок напружено-деформованого стану та тепловологісний аналіз зазвичай виконуються ізольовано. Теплотехнічні розрахунки стиків базуються на ідеалізованій, статичній геометрії замка, що не враховує його фактичного розкриття внаслідок циклічних кліматичних деформацій.

Виклад основного матеріалу

За результатами аналізу експлуатаційних дефектів встановлено, що деградація вузла має характер ланцюгової реакції: температурне жолоблення обкладок викликає зсувні деформації в сердечнику та зріз або розвантаження ущільнювальних стрічок. Це призводить до розгерметизації замкового з'єднання, утворення локальних лінійних містків холоду та різкого зростання повітропроникності.

Для коректного прогнозування експлуатаційної надійності вузлів пропонується реалізувати чотириетапну концептуальну схему зв'язаного комп'ютерного моделювання із застосуванням методів скінченних елементів та обчислювальної гідродинаміки:

1. Визначення просторово-часового розподілу температурних полів у перерізі панелі та вузла за заданих циклічних кліматичних впливів.

2. Моделювання НДС вузлового з'єднання з урахуванням анізотропії та температурної залежності властивостей сердечника, податливості анкерних кріплень і нелінійної контактної взаємодії у замку, визначення зміни геометрії шва та величини розкриття зазорів у стику.

3. Передача актуалізованої деформованої геометрії стику в CFD-модель фільтрації та вологопереносу для оцінювання конвективного переносу вологого повітря крізь утворені зазори й пошкоджені контури герметизації.

4. Визначення скоригованих значень лінійних коефіцієнтів теплопередачі з урахуванням конвективної складової та локалізація зон імовірної конденсації вологи за критеріями температури точки роси й мінімального температурного фактора f_{Rsi} з урахуванням базових положень [3, 4].

Висновки

Традиційне роздільне оцінювання механічної міцності та теплофізичних характеристик стиків тришарових сендвіч-панелей не відображає реальної кінетики їх деградації в умовах циклічних кліматичних навантажень. Запропонована чотириетапна схема зв'язаного моделювання дає змогу врахувати вплив температурного жолоблення обкладок на розкриття замкових з'єднань і подальший конвективний вологоперенос. Подальші дослідження будуть спрямовані на реалізацію зазначеної моделі в програмних комплексах та обґрунтування нових конструктивних рішень енергоефективних вузлів із деформаційними компенсаторами та терморозривами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ EN 14509:2017. Панелі теплоізоляційні самонесні з двобічним металевим облицюванням. Вироби заводського виготовлення. Технічні умови. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. 142 с.
2. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Київ: Мінрегіон України, 2022. 23 с.
3. ISO 10211:2017. Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures – Detailed calculations. Geneva: ISO, 2017. 55 p.
4. ISO 13788:2012. Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods. Geneva: ISO, 2012. 40 p.
5. Błaszczuk J., Pozorski Z. The influence of thermal actions and complex support conditions on the mechanical state of sandwich structure // Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics. 2013. Vol. 12, Iss. 4. P. 13–21.
6. Mareš J., Wald F., Sokol Z. Modelling of joints of sandwich panels // The Paramount Role of Joints into the Reliable Response of Structures / ed. by C. C. Baniotopoulos, F. Wald. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. P. 387–394. (NATO Science Series II; Vol. 4).
7. Impact of Elevated Temperatures on the Integrity of PIR-Core Roof Sandwich Panel Connections / A. Pawlak-Jakubowska et al. // Materials. 2026. Vol. 19, Iss. 1. Art. 64. DOI: 10.3390/ma19010064.

Козуб Андрій Русланович – аспірант, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: kozub.vntu@gmail.com.

Коц Іван Васильович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри «Інженерні системи у будівництві», Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: ivan.kots.2014@gmail.com.

Andrii Ruslanovych Kozub – Ph.D. candidate, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kozub.vntu@gmail.com.

Ivan Vasylovych Kots – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor in the Department of "Engineering Systems in Construction," Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: ivan.kots.2014@gmail.com.