

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ШЛЮНЬ НАТАЛІЯ ВОЛОДИМИРІВНА



УДК 539.3; 625.7/.8

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НЕОДНОРІДНИХ КОМПОЗИТИВ З
УРАХУВАННЯМ МАКРО І МІКРО ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ЕФЕКТІВ У НИХ**

05.23.17 – будівельна механіка

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі вищої математики Національного транспортного університету Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Трач Володимир Мирославович
Національний університет
водного господарства
та природокористування, м. Рівне,
в.о. завідувача кафедри мостів,
тунелів і будівельної механіки;

доктор технічних наук, професор
Данішевський Владислав Валентинович
Український державний
університет науки і технологій, м. Дніпро,
директор навчально-наукового інституту
«Придніпровська державна академія
будівництва та архітектури»;

доктор технічних наук, професор
Ориняк Ігор Володимирович
Національний технічний університет
України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ,
професор кафедри прикладної математики.

Захист відбудеться «23» вересня 2025 р. о 14.00 годині на засіданні докторської вченої ради Д 26.059.02 у Національному транспортному університеті за адресою: 01010, Україна, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, аудиторія 17.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного транспортного університету (01103, Україна, м. Київ, вул. М. Бойчука, 42).

Автореферат розісланий « 20 » серпня 2025 р.

В.о. вченого секретаря
докторської вченої ради

О. М. Ложажевська

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертації. Теоретичні принципи та практичні методи розрахунку конструктивних систем транспортних споруд мережі автомобільних доріг потребують удосконалення та розвитку з урахуванням нинішніх викликів, пов'язаних зі змінами впливових факторів різної фізичної природи.

Важливу роль у належному функціонуванні транспортних споруд відіграють конструкції дорожніх одягів доріг і мостів, що являють собою неоднорідні композити у вигляді лінійних шаруватих будівельних конструкцій значної протяжності, які є високовартісними під час будування та потребують великих витрат під час утримання. Останнім часом у світі спостерігається тенденція росту параметрів транспортного навантаження. Збільшується інтенсивність руху транспортних засобів, зростає доля великовагових автомобілів та автопоїздів зі збільшеною кількістю осей, загальною вантажопідйомністю та підвищеним тиском у пневматиках. Це стало суттєвим викликом для конструкцій дорожнього одягу, а також вагомим фактором зменшення їх довговічності, особливо в умовах глобальної зміни клімату. На такі підвищені параметри транспортного навантаження та кліматичні впливи існуюча автодорожня мережа України, побудована у минулому столітті, не була розрахована. Це стало одним із вагомих факторів зменшення довговічності конструкцій дорожнього одягу. Тому в сучасній практиці проєктування, будування та ремонтування дорожніх одягів все більш широко використовуються нові матеріали з досконалішими міцнісними, зносостійкими і термостійкими властивостями, створюються нові конструкції дорожнього одягу, які включають різноманітні підкріплюючі і армуючі елементи з різних матеріалів: металевих, склопластикових, базальтових, полімерних та ін. Розширюється асортимент композитних матеріалів шарів покриття та основи дорожніх одягів, постійно удосконалюються рецептури та технології їх виготовлення і застосування з використанням різноманітних модифікаторів, добавок, дисперсного армування. Однак, введення в один матеріал армуючих включень з іншого матеріалу може не тільки поліпшити узагальнені характеристики всього композиту, але при термічних впливах воно також може супроводжуватися породженням помітних додаткових локальних внутрішніх напружень, якщо термомеханічні характеристики компонент композиту несумісні. Для пластичних матеріалів ці напруження можуть призводити до локальних пластичних деформацій та дефектів, для крихких матеріалів – до локальних розтріскувань. Оскільки ці дефекти мають локалізований та прихований характер, вони не завжди піддаються виявленню.

Проблема неналежного врахування негативного впливу макро і мікро термомеханічних ефектів неоднорідних композитів полягає в тому, що на теперішній час при розгляді двох основних механізмів термічної деградації і руйнування композитів – зовнішнього та внутрішнього, основну увагу приділяють першому. Він обумовлений накладенням на систему зовнішніх в'язів і обмежень, що перешкоджають їй вільному термодформуванню. Наслідки прояву зовнішнього механізму є добре помітними, оскільки за його реалізації у системі виникають яскраво виражені макропошкодження, тріщини і навіть руйнування. На практиці таким ефектам приділяють підвищену увагу і для їх математичного моделювання

були розроблені спеціальні скінченно-елементні програми, які дають змогу прогнозувати їх з достатньою точністю. Другий механізм – внутрішній, є властивим для всіх середовищ зі змінними (і особливо, несумісними) термомеханічними характеристиками їх компонент, в тому числі для композитних матеріалів дорожнього одягу. Дефекти, тріщини і розшарування, що виникають в композитах внаслідок його прояву є прихованими і їх розвиток стає помітним лише після руйнування конструкції. У конструкціях дорожніх одягів внутрішній механізм руйнування, головним чином, виникає в комбінаціях: шари із композитних матеріалів на основі бітумних або полімерних матеріалів – металеві чи залізобетонні прогонові будови мостів або шари дорожнього одягу із композитних матеріалів на основі мінеральних чи комплексних в'язучих; бітум – мінеральні включення; бітум – металева стрижнева та дротяна арматура; бітум – склопластикові арматури; бетон – пластикова арматура та ін. В науковій літературі висновки про можливі негативні прояви таких комбінацій та негативну дію цього механізму, як правило, формулюються на рівні якісних експериментальних суджень, без аналітичних підтверджень.

Також особливо варто відзначити, що відомі дослідження з проєктування дорожніх одягів (жорстких і нежорстких), які направлені на удосконалення визначення їх напруженого стану, містять суттєві спрощення в моделюванні роботи цих конструкцій. Такі дослідження не враховують (як при новому будівництві так і при ремонті у разі влаштування шарів підсилення) наявність локальних дефектів конструкцій дорожнього одягу з температурними та технологічними швами, а також температурними та силовими тріщинами, що еволюціонують у процесі життєвого циклу. Вони не відображають температурну несумісність шарів дорожнього одягу та термонапруження, викликані градієнтами температури при її добових та сезонних коливаннях. Крім того, також, не враховується вплив на напружений стан від зовнішніх силових факторів внутрішньоструктурних термонапружень в околі структурної неоднорідності композитних матеріалів та їх армуючих елементів.

Відповідно, можна зауважити, що проблеми теоретичного аналізу внутрішньоструктурних термонапружень в шаруватих композитах і композитах зі стрижневими (волокнистими) і сферичними включеннями при термомеханічній несумісності параметрів їх фракцій є недостатньо вивченими. З погляду на це, поставлені та розв'язані в дисертаційній роботі проблеми є важливими та актуальними для розвитку методів розрахунків неоднорідних шаруватих будівельних конструкцій транспортних споруд й такими, що мають як наукове, так і прикладне значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно плану науково-дослідних робіт кафедри вищої математики Національного транспортного університету, а також в рамках держбюджетних тем №42 «Наукові основи прогнозування термомеханічних процесів в багатошаровому напівпросторі (на прикладі дорожнього покриття) для оцінки ресурсів підвищення його довговічності» (2017 – 2018 рр., номер державної реєстрації 0116U002631), №53 «Математичне моделювання напружено-деформованого стану дорожнього одягу з температурними швами і тріщинами»

(2018 – 2020 рр., номер державної реєстрації 0119U1011797) і № 60 «Дослідження впливу несумісності термомеханічних параметрів матеріалів покриттів доріг та мостів на їх термоміцність» (2021 – 2023 рр., номер державної реєстрації 0122U001429).

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає у розробленні моделей та методів розрахунку неоднорідних композитів транспортних споруд, зокрема конструкцій дорожнього одягу доріг і мостів, з урахуванням впливу несумісності макро і мікро термомеханічних ефектів у них, в умовах зміни температури.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати наступне:

- виконати аналіз механічних і математичних особливостей проблеми термопружного деформування багатошарових дорожніх конструкцій та провести аналіз термомеханічних параметрів дорожньо-будівельних матеріалів та металевих і неметалевих армуючих стрижнів, а також неоднорідних включень;
- розробити математичні моделі термонапруженого деформування шаруватих армованих дорожніх конструкцій на базі скінченно-елементного методу та розробити обчислювальну систему, яка включає препроцесор для обробки вихідної інформації, а також солвер для розв'язування скінченно-елементних рівнянь, а також постпроцесор для обробки результатів обчислень;
- провести теоретичне дослідження термонапруженого стану неоднорідних композитів конструкцій дорожнього одягу з сферичними включеннями в умовах стаціонарної зміни їх температури при термонесумісних параметрах їх компонентів;
- здійснити моделювання на основі числового експериментального дослідження полів температур і напружень в шаруватих конструкціях дорожнього одягу доріг і мостів, армованих стрижнями, при різних термосумісних та несумісних значеннях їх термомеханічних параметрів та в умовах однорідних та неоднорідних полів температури;
- провести числові експериментальні дослідження із визначення приведених термомеханічних характеристик фрагментів і масивів конструкцій дорожнього одягу доріг і мостів та розробити практичні рекомендації щодо зменшення або виключення додаткових концентраторів термонапружень, викликаних несумісністю термомеханічних характеристик компонентів неоднорідних композитів;
- розробити моделі та методи термопружного деформування і руйнування в композитних матеріалах транспортних споруд на макро та мікрорівнях під час замерзання води в їх порах і капілярах при їх неповному та повному заповненні;
- розробити моделі та методи визначення внутрішньоструктурних термонапружень в полімерних матеріалах, армованих карбоновими нанотрубками та фулеренами, що викликані термомеханічною несумісністю цих матеріалів.

Об'єктом дослідження є процеси, що впливають на міцність і довговічність неоднорідних композитів з урахуванням макро і мікро термомеханічних ефектів у них.

Предмет дослідження. Моделі та методи розрахунку неоднорідних композитів з урахуванням макро і мікро термомеханічних ефектів у них.

Методи дослідження: методи термопружності, які перебувають на перетині теорії пружності, термодинаміки, теорії теплопровідності та методів прикладної математики. Математичні моделі у вигляді систем алгебраїчних рівнянь та систем

диференціальних рівнянь спираються на використання методів математичного аналізу та комп'ютерних алгоритмів.

Наукова новизна отриманих результатів.

Уперше:

- розроблено математичні моделі та методи розрахунку полів термонапружень в неоднорідних шаруватих конструкціях дорожнього одягу доріг та мостів;
- розроблено моделі та методи визначення додаткових внутрішньоструктурних термонапружень в композитних матеріалах із зернистими включеннями в будівельних спорудах з шаруватими конструкціями;
- побудовано математичні моделі та методи визначення внутрішньоструктурних термонапружень в околі суцільних, неоднорідних та трубчастих армуючих стрижнів в композитних матеріалах шаруватих конструкцій дорожнього одягу;
- розроблено методи моделювання термонапруженого стану конструкцій дорожнього одягу з армуючими стрижнями та включеннями при термомеханічній сумісності і несумісності властивостей їх матеріалів та в умовах однорідних та неоднорідних полів температури за її зміни;
- проведено числові експериментальні дослідження про допустимі та недопустимі комбінації термомеханічних властивостей матеріалів в неоднорідних шаруватих конструкціях дорожнього одягу доріг та мостів;
- розроблено моделі та методи оцінювання дії водоморозних впливів на еволюцію додаткових термонапружень в композитних матеріалах (асфальто- та цементобетон) транспортних споруд протягом їх життєвого циклу;
- розроблено моделі та методи розвитку внутрішньоструктурних термонапружень в полімерних матеріалах шаруватих будівельних конструкцій, армованих карбоновими нанотрубками та фулеренами.

Удосконалено:

- методи дослідження явища розшарування конструкції дорожнього одягу внаслідок несумісності властивостей його шарів;
- моделі та методи прогнозування зародження та виключення внутрішнього механізму розвитку додаткових внутрішньоструктурних термонапружень в композитах конструкцій дорожнього одягу, викликаних несумісністю термомеханічних характеристик їх фаз.

Набули подальшого розвитку:

- методи визначення внутрішньоструктурного термонапруженого стану композитних матеріалів конструкцій дорожнього одягу з гумовими включеннями та уточнення причини їх пришвидшеної деградації, пов'язані з механічною несумісністю гуми та широкими межами зміни її коефіцієнта термічного розширення;
- підходи до визначення внутрішньоструктурних термонапружень в асфальтобетонних та цементобетонних матеріалах, підсилених фібергласовою, фіберкарбоновою, фібербазальтовою та фіберарамідною арматурами.

Практичне значення отриманих результатів полягає в:

- отриманні методів для теоретичного аналізу термоміцності шаруватих конструкцій дорожнього одягу доріг і мостів та визначення внутрішньоструктурних термодеоформацій і термонапружень в дорожніх конструкціях в тому числі із асфальтобетонних і цементобетонних матеріалів, що армовані суцільними, трубчастими, металевими та неметалевими (полімерними, карбоновими та іншими) стрижнями при різних конструктивних схемах та впливах на них змін температури за сучасних кліматичних умов України;
- використанні розробленого математичного забезпечення як інструменту для аналізу полів термонапружень станів неоднорідних конструкцій з врахуванням наявності розривів цих функцій і їх концентрації на інтерфейсних контактних поверхнях в умовах високоградієнтних полів температури. Моделювання концентрації внутрішньоструктурних термонапружень в дорожньому одязі дозволить понизити їх рівень та уникнути утворення локальних дефектів, тріщин, розшарувань і деструкцій;
- отриманні аналітичних рішень для визначення термопереміщень, деформацій та термонапружень в елементах конструкцій дорожнього одягу і можливості визначення наближеності їх стану до критичного в залежності від сумісності та несумісності термомеханічних параметрів фаз системи;
- проведенні цілеспрямованих розрахунків на міцність та дослідженні дорожньої конструкції при різних значеннях її геометричних та фізико-математичних параметрів, що дозволяють згладити концентратори напружень і деформації та підвищити довговічність системи.
- вирішенні проблеми раціонального вибору, при проектуванні дорожніх конструкцій, композитів із їх найбільш доцільними термомеханічними властивостями;
- уточненні прогнозування дії водоморозних впливів на тріщиностійкість асфальтобетонного покриття протягом його життєвого циклу при застосуванні розроблених методів та моделей.

Наукові розробки та практичні рекомендації щодо підвищення довговічності дорожніх конструкцій за рахунок зменшення або виключення додаткових концентраторів термонапружень, викликаних несумісністю термомеханічних характеристик неоднорідних композитних матеріалів впроваджено в ДП «НІРІ» Державного агентства відновлення та розвитку інфраструктури України, в КК «Київавтодор», ТОВ «КАПОНІР-ГРУП» та ТОВ «ДОРТРАНС».

Результати досліджень були впроваджені у навчальному процесі на кафедрі дорожньо-будівельних матеріалів і хімії факультету транспортного будівництва НТУ при викладанні дисципліни «Механіка дорожнього одягу» для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» освітньої програми «Технології будівельних конструкцій, виробів і матеріалів», а також дисципліни «Сучасні моделі та методи розрахунку дорожніх конструкцій з урахуванням термореологічних властивостей» для аспірантів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія». Крім того отримані результати досліджень використовувались в роботі зі студентами в наукових гуртках та підготовці ними наукових публікацій і доповідей на конференціях.

Особистий внесок здобувача. Отримані в представлений до захисту роботі розрахункові моделі, методи, підходи, основні результати, що складають дисертаційну роботу, здобуті автором. Вони відображені в індивідуальних та спільних публікаціях, де автор сформулював, поставив і розробив розрахункові математичні моделі задач для визначення концентраторів термонапружень в неоднорідних композитах. Особистий внесок здобувача у роботах, опублікованих у співавторстві, зазначено у списку опублікованих праць. стор. 44-51.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення та практичні результати дисертаційних досліджень доповідались, обговорювались і отримали позитивну оцінку на науково-практичних та науково-технічних, міжнародних конференціях та семінарах, серед яких: Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні підходи у відновленні транспортної інфраструктури в особливих умовах воєнного стану: виклики та перспективи» (Київ, Україна, 2024 р.); International scientific-practical conference «Science, education and technology: global trends and regional aspects» (Tampere, Finland, July 11, 2024); International scientific-practical conference «Current issues of science, education and technology in the context of modern challenges»: conference proceedings (Aarhus, Denmark, June 29, 2024); IEEE SAIC (Kyiv, Ukraine; 2020) Міжнародна конференція «Впровадження інноваційних матеріалів і технологій при проектуванні, будівництві та експлуатації об'єктів транспортної інфраструктури в рамках програми «Велике будівництво» НТУ (Київ, Україна, 2022 р.); Всеукраїнська науково-практична конференції «Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури» ДП «ДержавтотрансНДІпроект» (Київ, Україна, 2023 р.); III Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні методи і проблемно-орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій і їх застосування у проектуванні і навчальному процесі» (Україна, Київ, вересень 2019 р.); Всеукраїнська наукова конференція здобувачів освіти і молодих учених «Відбудова транспортної інфраструктури України» (Київ, Україна, червень 2023 р.); LXXIII науково-практична конференція науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету (Україна, Київ, 15 – 17 травня 2024 р.); LXXV науково-практична конференція науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету (Київ, Україна, 12 – 15 травня 2019 р.); LXXVII науково-практична конференція науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету (Київ, Україна, 15 – 17 травня 2021 р.); LXXIX науково-практична конференція науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету (Київ, Україна, 14 – 16 травня 2023 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 47 наукових праць, у тому числі: 4 колективних монографії, 9 статей у журналах, що включені до наукометричних баз Scopus та Web of Science, у тому числі 1 – одноосібна, 16 робіт опубліковано у фахових виданнях України, з них 6 – одноосібних, 12 праць апробаційного характеру, 3 патенти на корисну модель та 3 свідоцтва авторського права.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, чотирьох додатків та списку використаних джерел, який містить 296

найменувань. Вона містить 324 сторінки основного тексту, на яких 35 таблиць і 68 рисунків. Повний обсяг дисертації складає 420 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить загальну характеристику роботи. В ньому обґрунтована актуальність вибраної теми, сформульовані мета та задачі дослідження, наукова новизна та практичне значення одержаних результатів. Наведено відомості про апробацію та публікації результатів досліджень.

У першому розділі виконано аналіз механічних і математичних особливостей проблеми термопружного деформування шаруватих конструкцій дорожнього одягу доріг і мостів. Встановлено, що внутрішні та комбіновані механізми терморуїнувань особливо часто проявляються в композитних матеріалах, в яких термомеханічні властивості зв'язуючого та наповнювача мають термомеханічну несумісність. Вони особливо помітні в багатошарових асфальтобетонних покриттях автомобільних доріг і мостів, які не можуть вільно подовжуватися і скорочуватися у поздовжньому напрямку при збільшенні та зменшенні температури і в яких модулі пружності, коефіцієнти Пуассона та коефіцієнти лінійного температурного розширення мають різні значення. У конструкціях дорожнього одягу доріг та мостів він виникає в комбінаціях бітум – мінеральні включення, бітум – металева стрижнева та дротяна арматура, бітум – склопластикові арматура та ін. В науковій літературі, зазвичай, епізодично відзначаються можливі негативні прояви таких комбінацій, але не зустрічаються глибокі експериментальні і теоретичні опрацювання у цьому напрямі. Значний внесок в розвиток та побудову методів розрахунків, що стосуються дослідження проблем термонапружень у неоднорідних композитах та конструкціях дорожнього одягу, було зроблено такими авторами: Богомолів В.О., Радовський Б.С., Мозговий В.В., Гамеляк І.П., Гембара Н. О., Гуляєв В. І., Жданюк В.К., Гайдайчук В.В., Телтаєв Б.Б., Солодкий С.Й., Третьяченко Г.Н., Онищенко А.М., Agrawal A.K., Baumeister E., Klaeger S., Kaldos A., Bowskil G. J., Colwill D.M., Chen E.Y., Pan G.E., Norfolk T.S., Wang O., Christensen R.M., Czigany N., Kling S. A, Elwardany M.D., King G., Planche J.P., Alireza Afshar, Soheil Johandary, Haleh Rosekh, Baumeister E., Klaeger S., Kaldos A., Bhaskar B.S., Desmukh M.S., Choudhary S.K., Boatman B., та ін.

У розділі побудовано теоретичну модель термопружного деформування багатошарових дорожніх покриттів в декартовій системі координат.

Розглянуті умови відсутності і зародження термонапружень в тілах, що деформуються. Виділені три основні причини порушення умов вільного термодформування пружних тіл, що призводять до генерування в них термонапружень. До них відносяться накладені зовнішні в'язі, структурна неоднорідність тіла і термомеханічна несумісність параметрів його компонент, а також поля температури зі змінними градієнтами.

На базі співвідношень теорії термопружності встановлені умови геометричної та механічної подібності між прототипом і моделлю в конструкціях дорожнього одягу та дорожньо-будівельних матеріалах. Знайдені масштабні коефіцієнти для геометричних параметрів, модулів пружності та коефіцієнтів лінійного термічного розширення неоднорідних матеріалів, що забезпечують подібність для функцій

переміщень та рівностей функцій термонапружень у відповідних точках прототипу та моделі.

За допомогою умов теорії подібності дано пояснення ефекту термічного розшарування дорожнього покриття, що виникає в конструкціях дорожнього одягу доріг і мостів в результаті різниці коефіцієнтів лінійного температурного розширення покриття 1 та основи 2 (рис. 1).

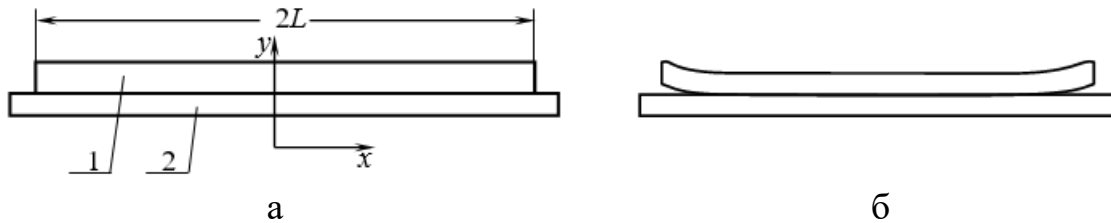


Рисунок 1 – Схема поперечного перерізу асфальтобетонного покриття в вихідному (а) та розшарованому (б) станах.

Розглядався випадок, коли асфальтобетонний шар 1 товщиною $h_1 = 0,07$ м пов'язаний з металевою основою 2 товщиною $h_2 = 0,014$ м. Значення термомеханічних параметрів системи склали: $E_1 = 5 \cdot 10^9$ Па, $\nu_1 = 0,2$, $\alpha_1 = 2,46 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$, $E_2 = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu_2 = 0,3$, $\alpha_2 = 1,3 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$. Термонапружений стан плоского фрагменту лівого краю цієї системи протяжністю 7,5 м вздовж осі Ox при температурі $T = -25^\circ\text{C}$ було визначено методом скінченного елемента. На рис. 2 виділено поле дотичних напружень τ_{xy} на правій ділянці системи довжиною 0,2 м.

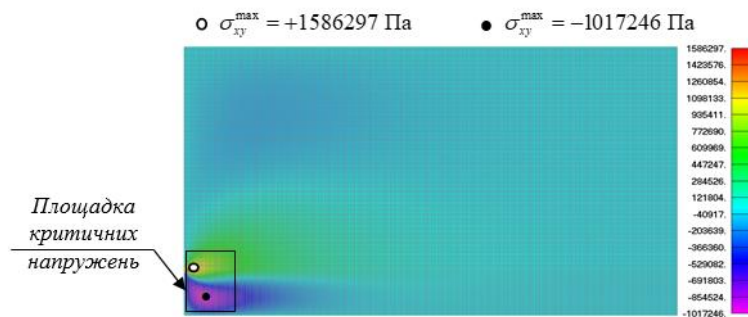


Рисунок 2 – Поле дотичних напружень σ_{xy} в крайовому перерізі двошарової конструкції

Як видно на більшій частині виділеного перерізу дотичні напруження мають майже нульові значення, і тільки поблизу лівого краю системи в її інтерфейсній зоні сформувалась площадка розміром приблизно $1,5 \text{ см} \times 2 \text{ см}$, в якій ці напруження мають пікові значення, що є основною причиною виникнення пластичних зсувних деформацій між шарами.

В цьому випадку, якщо протяжність зони пластичності матеріалу покриття виявляється достатньою для компенсації пластичних деформацій верхнього шару, то система зберігає свою цілісність, якщо ні, то у тому місці виникає відшарування верхнього шару. При цьому необхідно відзначити, що в результаті багатократних

змін температури та додаткових дій транспортних навантажень ймовірність виникнення локальних зсувних пошкоджень на цій ділянці зростає.

Важливо, що запобігання такого ефекту за рахунок збільшення товщини верхнього шару в l разів, призведе також до негативних наслідків, оскільки за умовами геометричної подібності термонапруження у відповідних точках нової моделі збережуть свої (критичні) значення, площа пластичних деформацій збільшиться в l^2 разів та запасу пластичної плинності матеріалу вже буде недостатньо. І навпаки, до більш позитивного результату приведе зменшення товщини шару, оскільки, хоча при цьому зсувні напруження у відповідних точках нової моделі не зміняться, площа критичних значень зменшиться в l^2 разів.

Однак за умовами експлуатації товщина h_1 верхнього шару на проїзній частині дороги має бути збережена, тому можна рекомендувати її поступове зменшення на крайових ділянках та її доведення до нуля на самих краях (рис. 3).

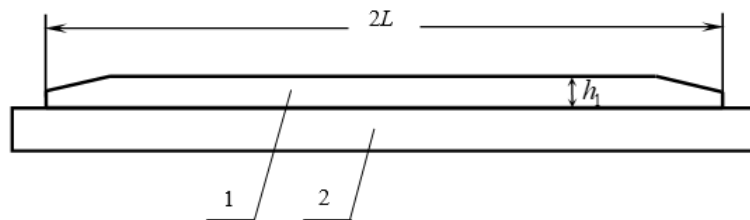


Рисунок 3 – Схема дорожнього покриття зі скошеними краями

Тоді розміри площадки критичних напружень на краях обернуться на нуль, а разом із нею зникнуть і самі напруження. Відмічений ефект узгоджується з ефектом усунення явища розшарування шаруватих композитів за рахунок створення на їх краях фасок.

У другому розділі виконано аналіз концентрації термонапружень в шаруватих конструкціях дорожнього одягу. Методом комп'ютерного аналізу розв'язування рівнянь нестационарної теплопровідності встановлено, що при обраних значеннях геометричних і термомеханічних параметрів дорожньої конструкції задача нестационарної теплопровідності при добових змінах навколишньої температури є сингулярно збуреною. Розглянуто процеси розвитку поля температури в масиві конструкції дорожнього одягу при зміні температури навколишнього середовища протягом доби. Приймалось, що температура T на поверхні покриття та придорожного ґрунту в денний час змінюється за законом синусоїди від деякого початкового (ранкового) значення T_0 до її денного максимуму $T_{\max}$ і ввечері знову падає до вихідного значення T_0 .

Вважалось, що в початковому стані температура всього масиву (як і T_0), деформації та напруження дорівнюють нулю і аналізувався процес термопружного деформування при зміні температури $T(t)$ на поверхні за законом

$$T(t) = (T_{\max} - T_0) \sin(\pi / 43200). \quad (1)$$

Тоді еволюція поля температури на границях кожного шару дорожнього одягу і масиву ґрунту визначається рівнянням нестационарної теплопровідності

$$\nabla^2 T - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

де $a = \lambda_q / c_{об}$ – коефіцієнт температуропровідності;

λ_q – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);

$c_{об}$ – питома об'ємна теплоємність, Дж/(м³·К);

доданок $\nabla^2 T$ – еквівалентний виразу $\partial T / \partial x^2 + \partial T / \partial y^2 + \partial T / \partial z^2$.

Поле пружних переміщень $\mathbf{u}(x, y, z)$ описується векторним рівнянням

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (x + \mu) \text{grad div} \mathbf{u} - (3\lambda + 2\mu) \alpha_T \text{grad}(T) = 0, \quad (3)$$

де λ і μ – ізотермічні параметри Ляме.

Граничні умови для функції $T(x, y, z, t)$ на вільній поверхні задаються у формі (1), на умовних кінцях виділеної області прийнято, що теплові потоки в напрямку нормалі відсутні, тому похідна від T за нормаллю $\mathbf{n}$ дорівнює нулю,

$$\partial T / \partial n = 0. \quad (4)$$

При формулюванні граничних умов для функції $\mathbf{u}(x, y, z)$ вважали, що на верхній поверхні середовище вільне від нормальних і дотичних напружень, а на бічних і нижній поверхнях умовних розрізів переміщення по нормалі і дотичній напруження дорівнюють нулю. На поверхнях контакту шарів конструкції дорожнього одягу між собою і з ґрунтовим масивом були прийняті умови сполучення функцій T і відповідних функцій переміщень і деформацій.

Прийнята постановка задачі про термопружне деформування виділеного багат шарового масиву дозволила використовувати алгоритм її вирішення, при якому спочатку розв'язується задача нестационарної теплопровідності для рівняння (2) на всьому діапазоні часу t , рівному 12 годин (43200 с). Потім в потрібні моменти часу t_i з використанням побудованих полів температури $T(x, y, z, t_i)$, за допомогою рівнянь (3) визначалися поля переміщень, деформацій і напружень.

Розв'язання цих рівнянь здійснюється шляхом переходу до скінченно-елементних моделей

$$\begin{aligned} [K_T] \{T\} - [A] \{\dot{T}\} &= \{T_f(t)\}; \\ [K_u] \{u\} &= [L] \{T(t_i)\}, \end{aligned} \quad (5)$$

де $[K_T]$ – матриця коефіцієнтів скінченно-елементної моделі рівняння теплопровідності,

$[A]$ – матриця коефіцієнтів моделі при похідній T ;

$\{T_f(t)\}$ – вектор заданих значень температури T на поверхні покриття;

$[K_u]$ – матриця жорсткості для скінченно-елементної моделі пружного масиву;

$[L]$ – матриця, яка відображає вплив температури на переміщення елементів масиву.

Після обчислення значень компонент вектора переміщень $\{u\}$ у вузлах скінченно-елементної моделі обчислювалися компоненти тензорів деформацій ε_{jk} і напружень σ_{jk} . Вони визначалися за допомогою рівностей

$$\begin{aligned}\varepsilon_{jk} &= \frac{1}{2}(u_{j,k} + u_{k,j}); \\ \sigma_{jk} &= 2\mu\varepsilon_{jk} + [\lambda\varepsilon_{ll} - (3\lambda + 2\mu)\alpha_T \cdot T]\delta_{jk},\end{aligned}\quad (6)$$

дискретизованих в кожному вузлі моделі.

У рівностях (6) індекси j, k, l набувають значень 1, 2, 3; напрямки x_1, x_2, x_3 відповідають напрямкам x, y, z ; $u_{j,k} = \partial u_j / \partial x_k$; $\varepsilon_{ll} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$; δ_{jk} – символ Кронекера, що дорівнює 0 при $j \neq k$ і рівний 1 при $j = k$.

За отриманою методикою проведено комп'ютерне моделювання конструкції дорожнього одягу (рис. 4) на основі скінченно-елементної моделі представленої на рис. 5. У табл. 1 наведені значення основних параметрів.

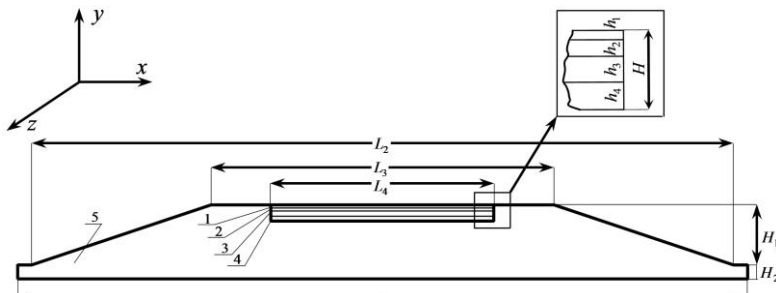


Рисунок 4 – Схема поперечного перерізу конструкції дорожнього одягу

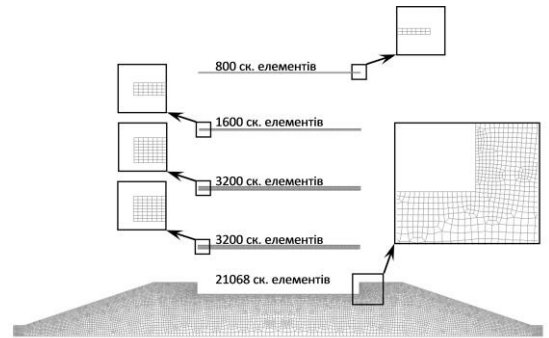


Рисунок 5 – Скінченно-елементна модель перерізу дороги

Таблиця 1 – Конструктивні параметри дорожнього одягу

Номер i шару	Матеріал	h_i (м)	E_i (Па)	ρ кг/м ³	ν	α_T С ⁻¹	λ Вт/(м·К)	$c_{об}$ Дж/(м ³ ·К)
1	Асфальтобетон дрібнозернистий	0,05	$5 \cdot 10^9$	2400	0,2	$2,46 \cdot 10^{-5}$	1,0	$3,77 \cdot 10^6$
2	Асфальтобетон пористий крупнозернистий	0,1	$1,4 \cdot 10^9$	2390	0,25	$1,92 \cdot 10^{-5}$	0,7	$2,63 \cdot 10^6$
3	Щебінь	0,2	$0,4 \cdot 10^9$	2300	0,3	$1,8 \cdot 10^{-5}$	0,5	$1,81 \cdot 10^6$
4	Пісок	0,2	$0,1 \cdot 10^9$	2050	0,3	$1,1 \cdot 10^{-5}$	1,5	$4,83 \cdot 10^6$
5	Ґрунт	2,5	$0,1 \cdot 10^9$	1960	0,35	$0,31 \cdot 10^{-5}$	1,05	$3,23 \cdot 10^6$



Рисунок 6 – Поле температури

Приймалося, що протягом дня температура на верхній поверхні покриття змінювалася за законом (1) при $T_0 = 0$, $T_{\max} = 12^\circ \text{C}$. На рис. 6 показано поле розподілу температури в поперечному перерізі конструкції дороги в момент часу $t = 6$ годин. Праворуч показані значення

температури в кожній точці перерізу.

На рис. 7 температурне поле представлено на окремих фрагментах системи. Видно, що в крайовій зоні верхньої поверхні покритву зосередженні максимальні значення температури. Схему шарів конструкції дорожнього одягу зображено на рис. 8. На осі Oy побудована функція для моменту часу $t=6$ год (рис. 8 б), яка показує, що помітні значення температури знаходяться на границях першого і половини другу шарів, а нижні шари і ґрунт залишилися непрогрітими. Рис. 8 в повторює в кольоровій формі рис. 8 б. На рис. 8 г представлена палітра кольорової шкали, яка відповідає кольоровому полю на рис. 8 в.

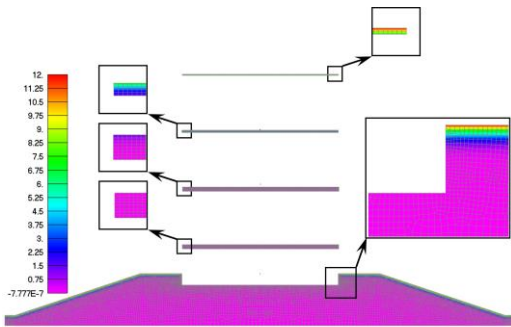


Рисунок 7 – Поля температури у фрагментах дороги

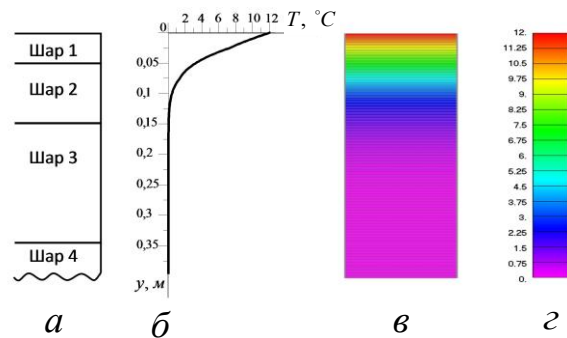


Рисунок 8 – Схема розподілу температури по глибині

Схему поперечного перерізу дороги в деформованому стані представлено на рис. 9. Вона залежить від неоднорідності температурного поля, характеристик пружності системи та її конструкції.

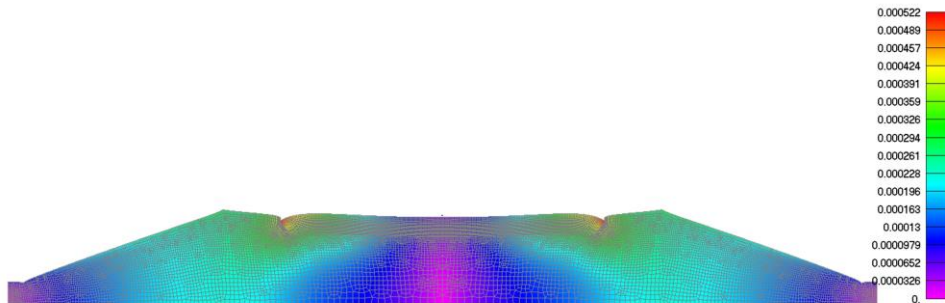


Рисунок 9 – Схема перерізу дороги в термодіформованому стані

Вважали, що нормальні напруження σ_{yy} на площадках $y = const$ малі і

$$\sigma_{yy} = 0. \quad (7)$$

Оскільки модуль пружності ґрунту E_5 значно менший модулів пружності $E_i (i = 1 \div 4)$ інших шарів покритву, то на його бічних границях ґрунтове середовище слабо перешкоджає вільному тепловому розширенню в бічному напрямку і шари майже вільно розширюються. Тому при додатній T деформація ε_{xx} також додатня.

За допомогою рівності $\sigma_{zz} = \sigma_{xx} - 2\mu\varepsilon_{xx}$ можна встановити ще одну характерну особливість розподілу полів термонапружень в даній структурі. Так як величина σ_{xx} порівняно мала і від'ємна і від неї віднімається немала величина (другий член з додатним ε_{xx}), то σ_{zz} набуває від'ємне і найбільше за модулем значення.

Сформульовані вище докази про особливості формування полів напружень σ_{xx} і σ_{zz} також відповідають даним чисельного аналізу (рис. 10 і 11, відповідно).

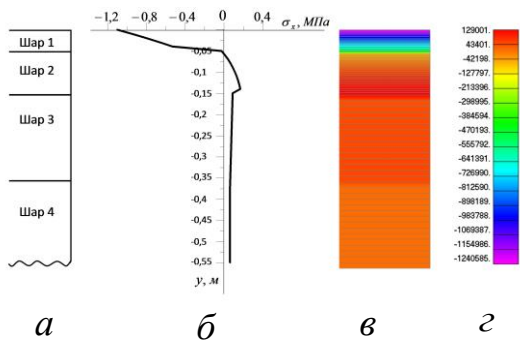


Рисунок 10 – Схема розподілу термопружних напружень σ_{xx} у виділеному центральному скінченно-елементному стовпці

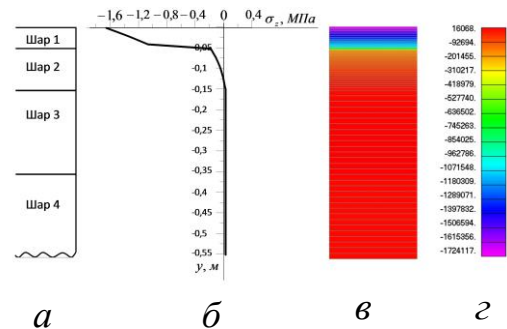


Рисунок 11 – Схема розподілу термопружних напружень σ_{zz} у виділеному центральному скінченно-елементному стовпці

Відзначимо також, що напруження σ_{xx} і σ_{xy} зростають зі збільшенням ширини дороги L_4 і зменшуються з її зменшенням.

Відповідно якщо ширина дороги велика і потрібно зменшити термопружні напруження, то це можна зробити за рахунок роздільного шва уздовж осової лінії дороги.

Отже, результати комп'ютерного моделювання підтвердили, що поля температури, що змінюються у часі, мають вигляд крайового ефекту, переважно зосередженого в зоні першого або першого і другого асфальтобетонних шарів і володіють високими градієнтами. Показано, що істотна неоднорідність полів напружень, яка пов'язана з розривами функцій напружень і їх концентрацією в крайовій зоні у вільній поверхні, залежить від високоградієнтної неоднорідності еволюціонуючих полів температури і шаруватої неоднорідності механічних характеристик шарів конструкцій дорожнього одягу, які супроводжуються також зміною модуля пружності асфальтобетонних дорожньо-будівельних матеріалів при зміні температури. Встановлено, що пікові значення поздовжніх напружень розтягу у верхньому шарі покриття і зсувних напружень, локалізованих між першим і другим шарами, можуть бути причиною спостережуваних на практиці в зимовий час утворення на дорозі на початковій стадії руйнування поперечних тріщин і її розшарування.

У третьому розділі на основі методів теорії термопружності виявлено та досліджено негативні термомеханічні ефекти можливих зароджень додаткових термонапружень у зернистих композитах залежно від несумісності термомеханічних параметрів їх компонент. Розглянуто випадки, коли армуючі сферичні зерна композитів є суцільним пружним тілом; включення зі сферичною порожниною; тіло, вкрите пружною сферичною оболонкою; а також випадок розподілу термонапружень у середовищі зі сферичною порою.

В результаті побудови аналітичних розв'язків поставлених завдань показано, що додаткові термонапруження в матриці композиту концентруються на поверхні її

контакту з включенням, вони пропорційні різниці значень коефіцієнтів лінійного температурного розширення фаз системи і пропорційно зменшуються кубу радіальної координати.

За допомогою конкретних прикладних прикладів встановлено, що навіть при порівняно помірних значеннях зміни температури додаткові термонапруження можуть досягати граничних значень, що сприяють утворенню в системі прихованих внутрішніх локалізованих дефектів і тріщин. Отримані розв'язки показали, що рівень концентрації термонапружень на сферичному включенні залежить від значень модулів пружності (жорсткості) контактуючих тіл. Зіставлення результатів для суцільного та порожнистого включень дозволяє зробити висновок, що введення порожнини у включення призводить до помітного зменшення внутрішньоструктурних термонапружень у матриці, яка має знижену міцність, та до збільшення напружень у включенні, що не є небезпечним, оскільки його міцність дуже велика. Тому можна вважати, що з точки зору забезпечення термостійкості композита введення порожнини в його включення є раціональним.

Для композита зі сферичними включеннями, покритими пружною оболонкою, дослідження показали, що в умовах зміни температури вплив додаткового шару на термодформування системи може відбуватися під дією двох факторів. По-перше, суттєву роль відіграє модуль пружності інтерфейсу. Так, при збільшенні пружної податності шару він може слугувати прокладкою, що нейтралізує або знижує деформаційний вплив більш жорсткого включення на матрицю. По-друге, позитивний ефект може досягатися завдяки спеціальному підбору коефіцієнта термічного розширення прокладки, що дозволяє за рахунок її заданої усадки чи дилатації компенсувати неузгодження термічних деформацій включення і матриці.

Розроблена методика була використана для дослідження концентрації термонапружень на поверхні мінеральних включень в асфальтобетоні. Оскільки асфальтобетон також є композитним матеріалом, при зміні його температури в ньому провокуються термонапруження, інтенсивність яких пропорційна рівню несумісності термомеханічних характеристик його фракцій. Для аналізу впливу несумісності термомеханічних параметрів матеріалу покриву на ініціювання в ньому додаткових внутрішніх термонапружень була вибрана розрахункова модель, що складається із нескінченного бітумного середовища з внутрішнім кулеподібним кам'яним включенням. Системі надавався додатний чи від'ємний приріст температури ΔT .

Дослідження проводилось в сферичній системі координат з початком, що співпадає з центром включення 1, радіус якого дорівнює r_1 . При розрахунках прийнято, що бітумне середовище обмежене сферичною поверхнею радіусом r_2 , який прямує до нескінченності (рис. 12).

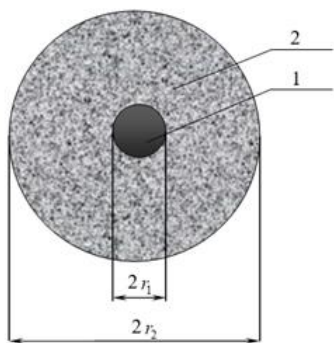


Рисунок 12 – Схема сферичного включення 1 в асфальтобетоні 2

Термонапруження в тілі 1 та середовищі 2 знаходились за формулами:

$$\sigma_r^{(1)} = \sigma_\varphi^{(1)} = \sigma_\theta^{(1)} = -\frac{2E_1E_2(1+\nu_1)(\alpha_1 - \alpha_2)T}{E_1(1+\nu_1)(1+\nu_2) + 2E_2(1-2\nu_2)}; \quad (8)$$

$$\sigma_r^{(2)}(r) = -\frac{2r_1^3}{r^3} \cdot \frac{E_1E_2(1+\nu_1)(\alpha_1 - \alpha_2)T}{E_1(1+\nu_1)(1+\nu_2) + 2E_2(1-2\nu_2)}; \quad (9)$$

$$\sigma_\varphi^{(2)}(r) = \sigma_\theta^{(2)}(r) = \frac{r_1^3}{r^3} \cdot \frac{E_1E_2(1+\nu_1)(\alpha_1 - \alpha_2)T}{E_1(1+\nu_1)(1+\nu_2) + 2E_2(1-2\nu_2)},$$

де E_i – модуль пружності, ГПа;

ν_i – коефіцієнт Пуассона;

α_i – коефіцієнт лінійного температурного розширення, $1/^\circ\text{C}$;

T – температура, $^\circ\text{C}$.

За формулами (8), (9) були обчислені напруження при найбільш типових значеннях температурних параметрів E_1 , $[\sigma_1]_{\text{міц}}$, α_1 , ν_1 кам'яних включень та E_2 , $[\sigma_2]_{\text{міц}}$, α_2 , ν_2 бітумної матриці, наведених в табл. 2 та 3. Розрахунки виконані при значеннях температури $T = -20, -30$ та -40 $^\circ\text{C}$ для її можливого добового приросту $\Delta T = 12$ $^\circ\text{C}$. Було розглянуто п'ять комбінацій матеріалів та температури з табл. 2 та 3. Результати обчислень подано в табл. 4. В позиціях 1, 2 та 5 цієї таблиці для включення 1 були вибрані найменші значення модулів пружності E_1 , в позиціях 3 і 4 для вапняку – найбільше значення $E_1 = 70$ ГПа.

Таблиця 2 – Значення термомеханічних параметрів кам'яних порід

	Кам'яна порода	E_1 , ГПа	$[\sigma_1]_{\text{міц}}$, МПа	ν_1	$10^5 \alpha_1$, $1/^\circ\text{C}$
1	Граніт	40-70	90-120	0,2-0,3	0,44
2	Вапняк	20-70	40-90	0,2-0,3	0,33
3	Мармур	50-100	80-140	0,2-0,3	0,56
4	Піщаник	5-15	5-150	0,2-0,3	0,65

Таблиця 3 – Значення термомеханічних параметрів бітуму

	T , $^\circ\text{C}$	E_2 , ГПа	$[\sigma_2]_{\text{міц}}$, МПа	ν_2	$10^5 \alpha_2$, $1/^\circ\text{C}$
1	20	0,6	-	0,5-0,45	1,72-2,23
2	10	1,4	-	0,5-0,45	1,72-2,23
3	0	3,2	2,5	0,5-0,45	1,72-2,23
4	-10	11	3,6	0,35	1,72-2,23
5	-20	56	4,0	0,35	1,72-2,23
6	-30	316	1,9	0,35	1,72-2,23
7	-40	1413	1,8	0,35	1,72-2,23

Таблиця 4 – Розрахункові значення термонапружень в бітумному середовищі на контактній поверхні $r = r_1$

	Кам'яна порода	$T, ^\circ C$	$\sigma_r^{(1)} = \sigma_r^{(2)}(r_1), \text{ МПа}$	$\sigma_\varphi^{(2)}(r_1), \text{ МПа}$	$[\sigma_1]_{\text{міц}}, \text{ МПа}$
1	Граніт	–20	0,01128	–0,00564	4,0
2	Граніт	–30	0,06348	–0,03174	1,9
3	Вапняк	–30	0,10491	–0,05246	1,9
4	Вапняк	–40	0,46699	–0,23344	1,8
5	Піщаник	–40	0,35247	–0,17623	1,8

При аналізі отриманих даних необхідно відмітити, що обрані для аналізу матеріали тіла 1 та бітуму 2 відрізняються не співставною різницею жорсткостей (модулів пружності). Тому включення 1 у всіх випадках відіграє роль абсолютно твердого тіла і зміна величини E_1 для різних кам'яних порід практично не впливає на рівень напруженого стану бітумного середовища, яке в основному, залежить від її модуля пружності та різниці значень коефіцієнтів лінійного розширення $(\alpha_1 - \alpha_2)$. В той же час ці коефіцієнти для обох фракцій відрізняються не суттєво, вони одного знаку та мають однаковий порядок. Тому додаткові термонапруження, що ініціюються в бітумі при вибраних умовах термічного впливу відносно малі і не співставні з їх граничними напруженнями, хоча вони можуть внести свій вклад в порушення міцності асфальтобетонного матеріалу в дорожньому одязі при спільній дії з транспортним навантаженням.

Крім цього, дослідження виконано на базі моделі самотнього включення ідеальної сферичної форми. Тому додаткова концентрація полів термонапружень на геометричних нерегулярностях форми включень та їх спільне накладання на сусідні концентратори мають привести до їх помітного зростання.

В даний час у світі все гостріше стає проблема утилізації відходів виробництва гуми, зокрема, гумових автомобільних шин, оскільки при їх захороненні та відкритому зберіганні відбувається забруднення повітря, стічних вод та ґрунтів шкідливими та отруйними продуктами їх розпаду. Одним із перспективних напрямків рециркуляції зношених шин є їх застосування в якості домішок в асфальтобетонні матеріали дорожніх покриттів. Однак, як показали натурні випробування, механічні властивості таких матеріалів в значній мірі залежать від домішок в матеріал і модифікації їхніх властивостей бітумною фракцією. Оскільки в науковому середовищі ці питання проаналізовані недостатньо, проблема їх вивчення є актуальною. У зв'язку з цим, було поставлено задачу про термонапружений стан асфальтобетонного дорожнього покриття з гумовими включеннями. Сформовано розв'язувальні рівняння термопружного деформування системи для сферичної моделі однорідного включення та включення, покритого сферичним шаром модифікованої гуми, побудовано їх аналітичні розв'язки.

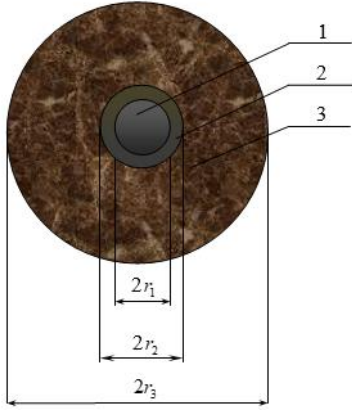


Рисунок 13 – Схема сферичного включення 1 зі сферичним прошарком 2, поміщених у пружне середовище 3

Для теоретичного моделювання термонапруженого стану асфальтобетонного середовища з гумовими включеннями 1, вкритим шаром модифікованого матеріалу 2, вважали, що включення має форму кулі радіусу r_1 , покриття обмежене сферичними поверхнями радіусами r_1 та r_2 , а радіус r_3 зовнішньої сфери матриці прямує до нескінченності (рис. 13).

Термопружна рівновага кожної із цих фракцій описується диференціальними рівняннями:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r^2 u^{(i)}) \right] = 0, \quad (i = \overline{1,3}), \quad (10)$$

де $u^{(i)}$ – радіальне переміщення i -го тіла системи.

Загальний розв'язок системи (10) має вигляд:

$$\begin{aligned} u^{(1)}(r) &= rC_1 + \frac{1}{r^2} C_2; & (r \leq r_1); \\ u^{(2)}(r) &= rC_3 + \frac{1}{r^2} C_4; & (r_1 \leq r \leq r_2); \\ u^{(2)}(r) &= rC_5 + \frac{1}{r^2} C_6; & (r_2 \leq r \leq r_3). \end{aligned} \quad (11)$$

Константи $C_1, C_2, \dots, C_6$, що сюди входять, знаходяться з умов рівності на контактних поверхнях $r = r_1$ та $r = r_2$ переміщень $u^{(i)}(r)$ та напружень

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(i)}(r) &= \frac{E_i(1-\nu_i)}{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)} \frac{du^{(i)}}{dr} + \frac{2E_i\nu_i}{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)} \frac{u^{(i)}}{r} - \frac{E_i}{(1-2\nu_i)} \alpha_i T; \\ \sigma_\varphi^{(i)}(r) &= \frac{E_i\nu_i}{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)} \frac{du^{(i)}}{dr} + \frac{E_i}{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)} \frac{u^{(i)}}{r} - \frac{E_i}{(1-2\nu_i)} \alpha_i T; \quad (i = \overline{1,3}), \end{aligned} \quad (12)$$

де E_i – модуль пружності, ГПа;

ν_i – коефіцієнт Пуассона;

α_i – коефіцієнт лінійного температурного розширення, $1/^\circ\text{C}$;

T – температура, $^\circ\text{C}$.

Після визначення величин $C_1, C_2, \dots, C_6$ використовуючи рівності (11), (12), обчислюються переміщення $u^{(i)}(r)$ та потім напруження $\sigma_r^{(i)}, \sigma_\varphi^{(i)}$.

В загальному випадку ці вирази мають громіздкий вигляд. Зведемо формули для напружень у випадку відсутності верхнього шару на гумовому включенні 1, в яких індексом 2 позначене пружне бітумне середовище матриці:

$$\begin{aligned}
\sigma_r^{(1)}(r) &= \sigma_\varphi^{(1)}(r) = \frac{2E_1E_2(\alpha_2 - \alpha_1)T}{E_1(1 + \nu_2) + 2E_2(1 - 2\nu_1)}; \quad (r \leq r_1); \\
\sigma_r^{(2)}(r) &= \frac{2r_1^3}{r^3} \frac{E_1E_2(\alpha_2 - \alpha_1)T}{[E_1(1 + \nu_2) + 2E_2(1 - 2\nu_1)]}; \quad (r \geq r_1); \\
\sigma_\varphi^{(2)}(r) &= -\frac{r_1^3}{r^3} \frac{2E_1E_2(\alpha_2 - \alpha_1)T}{[E_1(1 + \nu_2) + 2E_2(1 - 2\nu_1)]}; \quad (r \geq r_1).
\end{aligned} \tag{13}$$

За допомогою даних формул були встановлені основні особливості термодетормування бітуму з гумовими включеннями. При цьому використовували значення параметрів $E_1 = 1 \div 10$ МПа, $\nu_1 = 0,48 \div 0,5$, $\alpha_1 = 0$ для гуми та $E_2 = 3000$ МПа, $\nu_2 = 0,25$, $\alpha_2 = 2,46 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$ для бітуму. Звернемо увагу на значення E_1 і ν_1 для гуми. Якщо за їх допомогою обчислити об'ємний модуль пружності K при $\nu_1 \rightarrow 0,5$, то можна отримати

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \rightarrow \infty. \tag{14}$$

Це свідчить про те, що гума з технічної точки зору є нестисливим матеріалом. При такому значенні ν_1 формули (13) спрощуються:

$$\begin{aligned}
\sigma_r^{(1)}(r) &= \sigma_\varphi^{(1)}(r) = \frac{2E_2(\alpha_2 - \alpha_1)T}{1 + \nu_2}; \quad (r \leq r_1); \\
\sigma_r^{(2)}(r) &= \frac{2r_1^3}{r^3} \frac{E_2(\alpha_2 - \alpha_1)T}{1 + \nu_2}; \quad (r \geq r_1); \\
\sigma_\varphi^{(2)}(r) &= -\frac{r_1^3}{r^3} \frac{E_2(\alpha_2 - \alpha_1)T}{1 + \nu_2}; \quad (r \geq r_1).
\end{aligned} \tag{15}$$

За такого трактування стає помітно, що термонапруження в системі визначаються значеннями модуля пружності E_2 матриці та різницею $(\alpha_2 - \alpha_1)$ коефіцієнтів термічного розширення. В цьому випадку термонапруження $\sigma_r^{(1)}(r)$, $\sigma_\varphi^{(1)}(r)$ в матриці концентруються на поверхні сполучення фаз $r = r_1$ та спадають обернено пропорційно кубу радіальної координати r . Причому вони мають різні знаки і за модулем $\sigma_r^{(2)}(r)$ в два рази більше величини $\sigma_\varphi^{(2)}(r)$. Оскільки, наприклад, навіть при $T = 20^\circ\text{C}$ напруження $\sigma_r^{(2)}(r) = 2,362$ МПа знаходиться в зоні граничних значень для бітуму $[\sigma_{zp}] = 3 \div 8$ МПа, то можна зробити висновок, що при великих границях температури та додатковому впливу транспортного навантаження вони будуть перевищені та призведуть до дефектів на поверхнях контакту з гумою.

Термонапруження в бітумі можуть бути знижені, якщо гумові крихти модифікувати та створити на них перехідні шари з проміжними властивостями. Дослідження цього випадку було виконано за допомогою формул (10) – (12). Воно показало, що процедура модифікування може помітно знизити значення

термонапружень, однак її ефективність залежить від глибини проникнення змінених властивостей всередину крихти. Цим фактором можна пояснити низьку результативність технології модифікування по відношенню до крупних гумових крихт.

У четвертому розділі досліджені проблеми концентрації внутрішньоструктурних термонапружень у композиті з трубчастою, стрижневою та волокнистою арматурами.

Розглянуто питання про утворення додаткових термонапружень у середовищі асфальтобетонного дорожнього покриття при введенні в нього армуючого стрижня. На основі методів термопружності сформульовані диференціальні рівняння плоского осесиметричного деформованого стану нескінченного циліндричного пружного тіла в нескінченному пружному середовищі при стаціонарній зміні температури системи.

Сформульовано задачу про стаціонарне температурне деформування нескінченного пружного середовища 2 (матриці), яке армоване стрижнем 1 кругового перерізу радіуса r_1 . На рис. 14 виділено фрагмент цієї системи.

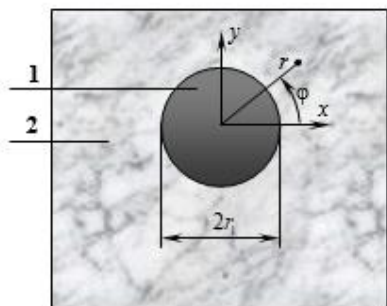


Рисунок 14 – Плоский фрагмент пружного середовища зі стрижневим включенням

Скористаємось циліндричною системою координат $O r \varphi z$, вісь Oz якої збігається з віссю стрижня. Термомеханічні характеристики стрижня 1 і середовища 2 визначаються, відповідно, параметрами Ляме λ_1 , μ_1 і λ_2 , μ_2 і коефіцієнтами температурного лінійного розширення α_1 і α_2 .

Температура системи стаціонарно змінюється на величину ΔT . Виділено випадок, коли термопружні відносні деформації $\varepsilon_z^{(i)}(r, \varphi, z)$ кожного з тіл $i = 1, 2$ уздовж осі Oz дорівнюють нулю і система знаходиться в плоскому осесиметричному термодформованому стані. Термопружна рівновага такої системи описується рівняннями

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r u^{(i)}) \right] = 0, \quad (i = 1, 2), \quad (16)$$

де $u^{(i)}$ – радіальне переміщення i -го тіла системи.

Проінтегрувавши ліву частину рівняння (16) двічі по r , отримали його розв'язок

$$\begin{aligned} u^{(1)}(r) &= r C_1 + \frac{1}{r} C_2 \quad \text{при } i = 1; \\ u^{(2)}(r) &= r C_3 + \frac{1}{r} C_4 \quad \text{при } i = 2. \end{aligned} \quad (17)$$

Невідомі константи C_i ($i=\overline{1,4}$), що сюди входять, визначаються з граничних умов і рівняння контакту при $r = r_1$

$$u^{(0)}(0) = 0; \quad (18)$$

$$u_r^{(1)}(r_1) = u_r^{(2)}(r_1); \quad (19)$$

$$\sigma_r^{(1)}(r_1) = \sigma_r^{(2)}(r_1); \quad (20)$$

$$\sigma_r^{(2)}(r) \rightarrow 0 \text{ при } r \rightarrow \infty. \quad (21)$$

Знаючи константи C_i ($i=\overline{1,4}$), знаходяться функції переміщень

$$\begin{aligned} u^{(1)}(r) &= \frac{r[(3\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)\alpha_1 + (3\lambda_2 + 2\mu_2)\mu_2\alpha_2]\Delta T}{2(\lambda_1 + \mu_1 + \mu_2)(\lambda_2 + \mu_2)}; \quad (0 \leq r \leq r_1); \\ u^{(2)}(r) &= r \frac{(3\lambda_1 + 2\mu_2)}{2(\lambda_2 + \mu_2)} \alpha_2 \Delta T + \\ &+ \frac{r_1^2}{r} \frac{[(3\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)\alpha_1 - (3\lambda_2 + 2\mu_2)(\lambda_1 + \mu_1)\alpha_2]\Delta T}{2(\lambda_1 + \mu_1 + \mu_2)(\lambda_2 + \mu_2)}; \quad (r \geq r_1). \end{aligned} \quad (22)$$

В рівнянні для $u^{(2)}(r)$ першим доданком є радіальне переміщення в однорідному середовищі 2 за відсутності стрижня 1, другий доданок обумовлений впливом тіла 1. Воно зменшується пропорційно до радіусу r_1 .

Напруження у стрижні 1 знаходяться за формулами

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(1)}(r) = \sigma_\varphi^{(1)} &= -\frac{\mu_2[(3\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)\alpha_1 - (3\lambda_2 + 2\mu_2)(\lambda_1 + \mu_1)\alpha_2]\Delta T}{(\lambda_1 + \mu_1 + \mu_2)(\lambda_2 + \mu_2)}; \\ \sigma_z^{(1)}(r) &= \frac{[-(3\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)(\mu_1 + \mu_2)\alpha_1 + (3\lambda_2 + 2\mu_2)\lambda_1\mu_2\alpha_2]\Delta T}{(\lambda_1 + \mu_1 + \mu_2)(\lambda_2 + \mu_2)}; \quad (0 \leq r \leq r_1); \end{aligned} \quad (23)$$

і в середовищі 2

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(2)}(r) &= -\frac{r_1^2}{r^2} \frac{\mu_2[(3\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)\alpha_1 - (3\lambda_2 + 2\mu_2)(\lambda_1 + \mu_1)\alpha_2]\Delta T}{(\lambda_1 + \mu_1 + \mu_2)(\lambda_2 + \mu_2)}; \\ \sigma_\varphi^{(2)}(r) &= \frac{r_1^2}{r^2} \frac{\mu_2[(3\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)\alpha_1 - (3\lambda_2 + 2\mu_2)(\lambda_1 + \mu_1)\alpha_2]\Delta T}{(\lambda_1 + \mu_1 + \mu_2)(\lambda_2 + \mu_2)}; \\ \sigma_z^{(2)}(r) &= -\frac{\mu_2(3\lambda_2 + 2\mu_2)}{(\lambda_2 + \mu_2)} \alpha_2 \Delta T; \quad (r \geq r_1). \end{aligned} \quad (24)$$

Графіки цих функцій (рис. 15) свідчать про те, що додаткові термонапруження $\sigma_r^{(2)}(r)$, $\sigma_\varphi^{(2)}(r)$, викликані включенням в середовище 2 армуючого стрижня 1, мають локальний характер і зменшуються пропорційно квадрату радіальної координати.

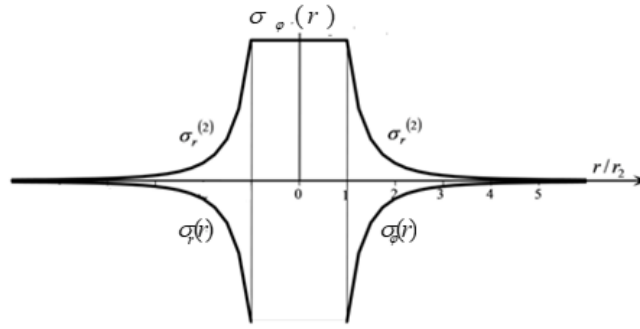


Рисунок 15 – Графіки розподілу напружень $\sigma_r(r)$, $\sigma_\varphi(r)$ у площині осьового перерізу армованої системи при плоскому термодіформуванні

Крім того, вони рівні один одному за модулем і відрізняються знаками, які залежать від співвідношення величин α_1 і α_2 . Так, якщо $\alpha_1 > \alpha_2$, то, як випливає з виду чисельників формули (24), при $\Delta T > 0$, $\alpha_1 > \alpha_2$, має місце співвідношення $\sigma_r^{(2)}(r) < 0$, $\sigma_\varphi^{(2)}(r) > 0$ і, якщо $\alpha_1 < \alpha_2$, то, навпаки, $\sigma_r^{(2)}(r) > 0$, $\sigma_\varphi^{(2)}(r) < 0$. Це означає, що, оскільки асфальтобетон при розтягуванні має меншу міцність, ніж при стисканні, при будь-яких змінах температури ΔT будуть реалізовуватися несприятливі термонапруження $\sigma_r^{(2)}(r)$ або $\sigma_\varphi^{(2)}(r)$.

Очевидно також, що значення термомеханічних параметрів, при яких чисельники дробів (20) функцій $\sigma_r^{(2)}(r)$, $\sigma_\varphi^{(2)}(r)$ дорівнюють нулю, є термічно сумісними. Тому рівність

$$(3\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)\alpha_1 - (3\lambda_2 + 2\mu_2)(\lambda_1 + \mu_1)\alpha_2 = 0 \quad (25)$$

є умовою сумісності термомеханічних параметрів матриці та армуючого стрижня.

Як приклад було розглянуто випадок, коли склопластиковий армуючий стрижень радіуса r_1 з термомеханічними параметрами $\lambda_1 = 30,2$ ГПа, $\mu_1 = 12,9$ ГПа, $\alpha_1 = 0,9 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ знаходиться в асфальтобетонному середовищі з параметрами $\lambda_2 = 1,38$ ГПа, $\mu_2 = 0,923$ ГПа, $\alpha_2 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Припускалось, що $\Delta T = -20^\circ \text{ K}$. При цих даних термонапруження у системі склали $\sigma_r^{(1)} = \sigma_\varphi^{(1)} = 1,298$ МПа, $\sigma_z^{(1)} = 15,541$ МПа, $\sigma_r^{(2)} = 1,298 \frac{r_1^2}{r^2}$ МПа, $\sigma_z^{(2)} = -1,298 \frac{r_1^2}{r^2}$ МПа, $\sigma_z^{(2)} = 0,9986$ Мпа.

Якщо врахувати, що межа міцності асфальтобетону при стисканні становить $5 \div 20$ МПа, а при розтягуванні він виявляється в $6 \div 8$ раз менше цих значень, то можна зробити висновок, що за розглянутих умов додаткові термонапруження в асфальтобетоні, викликані введенням в нього армуючого стрижня зі склопластику, можуть призводити до виникнення локальних дефектів у його малому okolí.

Запропоновано спосіб зниження додаткових термонапружень шляхом зменшення радіальної жорсткості арматури за рахунок заміни суцільного стрижня

порожнистою трубкою. Теоретичне моделювання цього ефекту показало, що зі зменшенням товщини стінки трубки зниження додаткових контактних термонапружень в асфальтобетоні стає суттєвим.

У табл. 5 наведено значення напружень $\sigma_r^{(1)}$, $\sigma_\phi^{(1)}$, $\sigma_z^{(1)}$ на поверхнях $r = r_1$ і $r = r_2$ склопластикового тіла 1 і напружень $\sigma_r^{(2)}$, $\sigma_\phi^{(2)}$, $\sigma_z^{(2)}$ на поверхні $r = r_2$ асфальтобетонного середовища 2 для відношень $r_1 / r_2 = 0,5, 0,75$ і $0,9$ при значеннях термомеханічних параметрів, наведених вище, і перепаді температури $\Delta T = -20^\circ$.

Таблиця 5 – Значення термонапружень у середовищі, армованому трубчастим стрижнем

Види термонапружень	r_1 / r_2			
	0,0	0,5	0,75	0,9
$\sigma_r^{(1)}(r_1)$ МПа	1,2981	0	0	0
$\sigma_\phi^{(1)}(r_1)$ МПа	1,2981	3,2455	4,5766	7,3764
$\sigma_z^{(1)}(r_1)$ МПа	15,541	15,569	16,235	17,215
$\sigma_r^{(1)}(r_2)$ МПа	1,2981	1,2171	1,0011	0,7008
$\sigma_\phi^{(1)}(r_2)$ МПа	1,2981	2,0285	3,5742	6,6752
$\sigma_z^{(1)}(r_2)$ МПа	15,541	15,569	16,235	17,215
$\sigma_r^{(2)}(r_2)$ МПа	1,2981	1,2171	1,0011	0,7008
$\sigma_\phi^{(2)}(r_2)$ МПа	-1,2981	-1,2171	-1,0011	-0,7008
$\sigma_z^{(2)}(r_2)$ МПа	0,9986	0,9986	0,9986	0,9986

На рис. 16 показані графіки розподілу функцій додаткових термонапружень $\sigma_r^{(i)}(r)$, $\sigma_\phi^{(i)}(r)$, у радіальному напрямку для випадку $r_1 / r_2 = 0,75$.

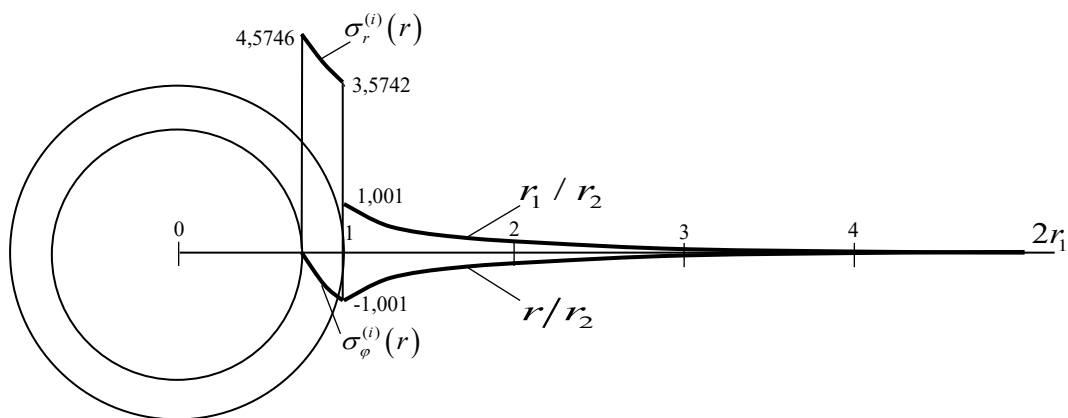


Рисунок 16 – Графіки розподілу термонапружень $\sigma_\phi^{(2)}$, $\sigma_r^{(2)}$ (МПа) для випадку $r_1 / r_2 = 0,75$

Отримані результати досліджень показали, що додаткові термонапруження $\sigma_r^{(2)}(r)$, $\sigma_\phi^{(2)}(r)$ в асфальтобетоні мають найбільші значення на поверхні контакту $r = r_2$ і вони швидко зменшуються в радіальному напрямку.

Аналіз наведених результатів свідчить про те, що заміна суцільного армуючого стрижня трубчастим призводить до помітного зменшення додаткових локальних термонапружень у середовищі матриці, хоча при цьому дещо підвищуються термонапруження в стрижні. Цей ефект стає більш відчутним із зменшенням товщини стрижня трубки.

Розглянуті питання зниженої корозійної стійкості мостових бетонних конструкцій, армованих сталевими стрижнями з епоксидним покриттям та обумовленої цим ефектом заборони такої арматури в мостобудуванні деяких регіонів американського континенту.

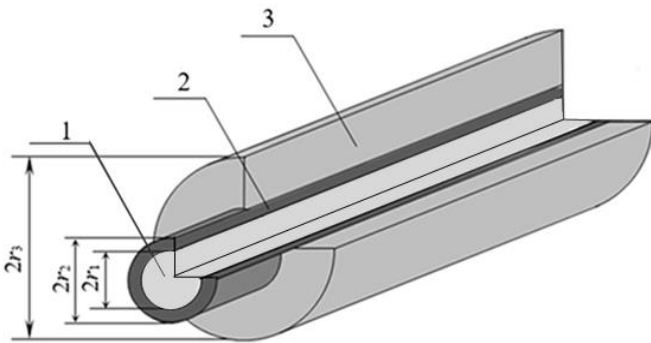


Рисунок 17 – Схема включення 1, покритого шаром 2, в середовищі матриці 3

Із застосуванням методів термопружності розроблено математичну модель і виведено диференціальні рівняння, що описують пружне деформування цементобетонного середовища 3, що містить сталевий армуючий стрижень 1 з епоксидним покриттям 2 при заданій зміні температури T (рис. 17).

Термомеханічні властивості фаз системи визначаються їх модулями

пружності E_i , коефіцієнтами Пуассона ν_i , границями міцності на розтягування $[\sigma]_i$ та коефіцієнтами лінійного термічного розширення (КЛТР) α_i . Для сталюого стрижня 1, епоксидного покриття 2 та цементобетонної матриці 3 вони складають, відповідно: $E_1 = 210$ ГПа, $\nu_1 = 0,3$, $[\sigma]_1 = 250 \div 2600$ МПа, $\alpha_1 = 1 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$; $E_2 = 3,8 \div 5,8$ ГПа, $\nu_2 = 0,33$, $[\sigma]_2 = 40 \div 80$ МПа, $\alpha_2 = 5,5 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$; $E_3 = 30 \div 50$ ГПа, $\nu_3 = 0,2$, $[\sigma]_3 = 2 \div 5$ МПа, $\alpha_3 = 1 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$. Основна особливість цих даних полягає в тому, що КЛТР епоксидного шару більш, ніж в 5 разів перевищує цю величину для сталі та бетону, а бетон має вкрай низьку міцність при розтягуванні.

Розв'язувальні рівняння системи виражаються через рівняння кожної фракції композита

$$\begin{aligned}
\frac{d^2 u^{(1)}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du^{(1)}}{dr} - \frac{1}{r^2} u^{(1)} &= 0; \quad (0 \leq r \leq r_1); \\
\frac{d^2 u^{(2)}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du^{(2)}}{dr} - \frac{1}{r^2} u^{(2)} &= 0; \quad (r_1 \leq r \leq r_2); \\
\frac{d^2 u^{(3)}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du^{(3)}}{dr} - \frac{1}{r^2} u^{(3)} &= 0; \quad (r \geq r_2),
\end{aligned} \tag{25}$$

де $u^{(i)}$ ($i=1,2,3$) – радіальне переміщення пружного елемента.

Розв'язок рівнянь (25) має вигляд

$$\begin{aligned}
u^{(1)}(r) &= rC_1 + \frac{1}{r}C_2; \quad (0 \leq r \leq r_1); \\
u^{(2)}(r) &= rC_3 + \frac{1}{r}C_4; \quad (r_1 \leq r \leq r_2); \\
u^{(3)}(r) &= rC_5 + \frac{1}{r}C_6; \quad (r \geq r_2),
\end{aligned} \tag{26}$$

де C_i ($i=\overline{1,6}$) – константи, що визначаються з умов на граничних поверхнях

$$\begin{aligned}
u^{(1)}(0) &= 0; & u^{(1)}(r_1) &= u^{(2)}(r_1); \\
\sigma_r^{(1)}(r_1) &= \sigma_r^{(2)}(r_1); & u^{(2)}(r_2) &= u^{(3)}(r_2); \\
\sigma_r^{(2)}(r_2) &= \sigma_r^{(3)}(r_2); & \sigma_r^{(3)}(r_3) &\rightarrow 0 \text{ при } r_3 \rightarrow \infty.
\end{aligned} \tag{27}$$

Після знаходження констант можна знайти термонапруження у фракціях 1-3:

$$\begin{aligned}
\sigma_r^{(1)}(r) &= \sigma_\varphi^{(1)}(r) = 2(\lambda_1 + \mu_1)C_1 - (3\lambda_1 + 2\mu_1)\alpha_1 T; \quad (0 \leq r \leq r_1); \\
\sigma_r^{(2)}(r) &= 2(\lambda_2 + \mu_2)C_3 - \frac{2\mu_2}{r^2}C_4 - (3\lambda_2 + 2\mu_2)\alpha_2 T; \quad (r_1 \leq r \leq r_2); \\
\sigma_\varphi^{(2)}(r) &= 2(\lambda_2 + \mu_2)C_3 + \frac{2\mu_2}{r^2}C_4 - (3\lambda_2 + 2\mu_2)\alpha_2 T; \quad (r_1 \leq r \leq r_2); \\
\sigma_r^{(3)}(r) &= -\frac{2\mu_3}{r^2}C_6; \quad (r \geq r_2); \\
\sigma_\varphi^{(3)}(r) &= \frac{2\mu_3}{r^2}C_6; \quad (r \geq r_2).
\end{aligned} \tag{28}$$

Функції (28) були обчислені при заданих параметрах $\lambda_i, \mu_i, \alpha_i$ ($i=\overline{1,3}$):

$\lambda_1 = 121,2$ ГПа, $\mu_1 = 80,77$ ГПа, $\alpha_1 = 1 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$, $\lambda_2 = 4,233$ ГПа, $\mu_2 = 2,18$ ГПа, $\alpha_1 = 5,5 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$, $\lambda_3 = 13,89$ ГПа, $\mu_1 = 20,83$ ГПа, $\alpha_1 = 1 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$.

В табл. 6 наведені значення термонапружень в граничних точках $r=0$, $r=r_1$ та $r=r_2$ системи при зміні температури від 0°C до $T=-30^\circ\text{C}$ для випадків $r_1/r_2 = 0,9; 0,95$ та $0,98$, в яких товщини h шарів епоксидного покриття склали $h=0,1r_2; 0,05r_2$ та $0,02r_2$, де r_2 – радіус армуючого стрижня з епоксидним покриттям.

Таблиця 6 – Значення термонапружень $\sigma_r^{(i)}(r)$, $\sigma_\varphi^{(i)}(r)$ ($i = \overline{1,3}$) в граничних точках композиту при $T = -30^\circ \text{C}$

$\sigma_r^{(i)}(r), \sigma_\varphi^{(i)}(r)$ МПа	$\frac{r_1}{r_2} = 0,9$	$\frac{r_1}{r_2} = 0,95$	$\frac{r_1}{r_2} = 0,98$
$\sigma_r^{(1)}(0) = \sigma_r^{(1)}(r_1)$	7,179	4,695	2,732
$\sigma_\varphi^{(1)}(0) = \sigma_\varphi^{(1)}(r_1)$	7,179	4,695	2,732
$\sigma_r^{(2)}(r_1)$	7,179	4,695	2,732
$\sigma_\varphi^{(2)}(r_1)$	11,292	14,135	13,133
$\sigma_r^{(2)}(r_2)$	7,967	5,161	2,937
$\sigma_\varphi^{(2)}(r_2)$	9,042	13,675	12,927
$\sigma_r^{(3)}(r_2)$	7,967	5,161	2,937
$\sigma_\varphi^{(3)}(r_2)$	-7,967	-5,161	-2,937

Графіки функцій $\sigma_r^{(i)}(r)$, $\sigma_\varphi^{(i)}(r)$ для випадку $r_1/r_2 = 0,9$ наведені на рис. 18. Як видно, функція $\sigma_r(r)$ є ламаною, функція $\sigma_\varphi(r)$ – розривною.

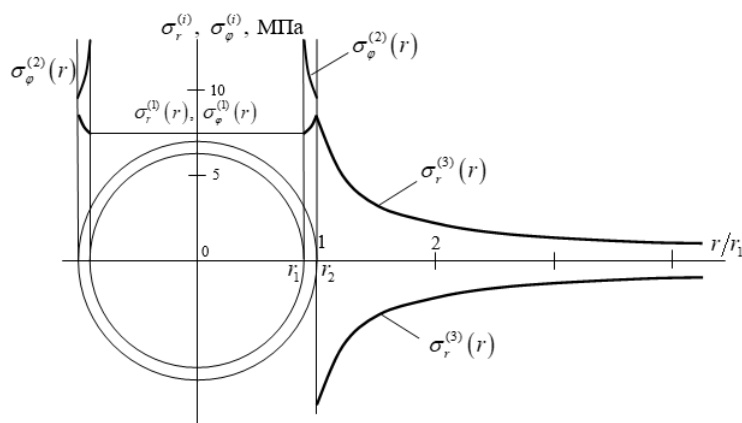


Рисунок 18 – Графіки розподілу термонапружень в композиті при $r_1 / r_2 = 0,9$, $T = -30^\circ \text{C}$

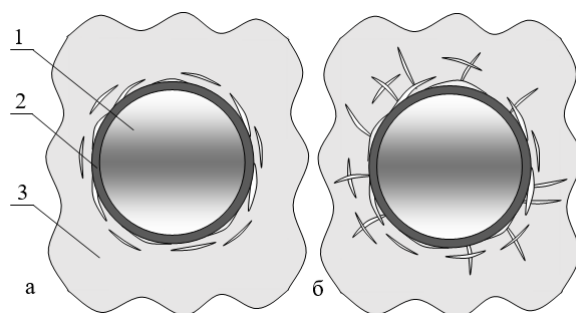


Рисунок 19 – Схеми утворення термопошкоджень в цементобетонній матриці в околі епоксидного покритву

Проаналізувавши отримані результати, можна зробити висновок, що у всіх випадках при вибраній температурі $T = -30^\circ \text{C}$ термонапруження в сталевому стрижні 1 та епоксидному шарі 2 далекі від граничних, однак в бетонному середовищі вони перевищують її границі міцності. Причому при від'ємних значеннях T радіальні напруження виявляються розтягуючими, а колові – стискаючими. Це означає, що викликані термопошкодження реалізуються у вигляді колових тріщин та відшарувань в бетоні (рис. 19 а). Оскільки ці напруження швидко спадають (див. рис. 18), тріщини, що виникли, концентруються в малому околі поверхні $r = r_2$, вони виявляються короткими в коловому напрямі, але розташовуються вздовж всієї довжини стрижня. Все це сприяє поступовій

деструкції структурних зв'язків цементобетону з арматурою, у зв'язку з тим, що волога може проникати у бетон розповсюджуючись також по всій його довжині, заповнюючи при цьому такі дефекти.

Ці явища супроводжуються додатковими механічними ефектами при зміні знаку температури T з від'ємного до додатного. В цьому випадку термонапруження у бетоні в околі арматури також можуть досягати граничних значень, однак цього разу радіальні напруження виявляються стискаючими, а колові розтягуючими. Це призводить до виникнення в бетоні додаткових радіальних тріщин (рис. 19 б), порушенню цілісності бетону в цій зоні, втраті зв'язку між епоксидним шаром та бетоном та зміні механізму наступної термомеханічної взаємодії фаз системи.

Поставлена задача про математичне визначення внутрішньоструктурних термонапружень в асфальтобетонних та цементобетонних матеріалах, підсилених фібергласовою, фіберкарбоновою, фібербазальтовою та фіберарамідною арматурами. В замкненій формі виписані вирази для радіальних та колових термонапружень, що викликаються зміною температури системи.

Нехай армуючий стрижень 1 колового перерізу радіусу r_1 знаходиться в середовищі 2 пружного матеріалу.

Враховуючи локалізований характер розподілення внутрішньоструктурних термонапружень в околі поверхні $r = r_1$, для аналізу виділимо циліндричну область $r \leq r_2$, де $r_2 \rightarrow \infty$. Розрахунки виконані в циліндричній системі координат $Or\varphi z$, вісь Oz якої співпадає з осьовою лінією стрижня.

В окремому випадку, за відсутності ізолюючого покриття, вирази для радіальних переміщень в стрижні 1 та середовищі 2 при зміні температури на величину T мають вигляд:

$$\begin{aligned} u^{(1)} &= \frac{r(1+\nu_1)(1+\nu_2)}{\left[(1+\nu_2)E_1 + (1+\nu_1)(1-2\nu_1)E_2\alpha_2\right]} \left[E_1\alpha_1 + (1-2\nu_1)E_2\alpha_2\right]T, \quad (0 \leq r \leq r_1); \\ u^{(2)}(r) &= r(1+\nu_2) + \frac{r_1^2(1+\nu_2)E_1\left[(1+\nu_1)\alpha_1 - (1+\nu_2)\alpha_2\right]T}{r\left[(1+\nu_2)E_1 + (1+\nu_1)(1-2\nu_1)E_2\alpha_2\right]}; \quad (r_1 \leq r). \end{aligned} \quad (29)$$

Внутрішньоструктурні радіальні та колові термонапруження в тілі 1 та відповідні термонапруження в середовищі 2 визначають формули:

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(1)}(r) &= \sigma_\varphi^{(1)}(r) = -E_1E_2T \frac{(1+\nu_1)\alpha_1 - (1+\nu_2)\alpha_2}{(1+\nu_2)E_1 + (1+\nu_1)(1-2\nu_1)E_2}; \quad (0 \leq r \leq r_1); \\ \sigma_r^{(2)}(r) &= -\frac{r_1^2}{r^2}E_1E_2T \frac{(1+\nu_1)\alpha_1 - (1+\nu_2)\alpha_2}{(1+\nu_2)E_1 + (1+\nu_1)(1-2\nu_1)E_2}; \quad (r_1 \leq r); \\ \sigma_\varphi^{(2)}(r) &= \frac{r_1^2}{r^2}E_1E_2T \frac{(1+\nu_1)\alpha_1 - (1+\nu_2)\alpha_2}{(1+\nu_2)E_1 + (1+\nu_1)(1-2\nu_1)E_2}; \quad (r_1 \leq r). \end{aligned} \quad (30)$$

Обчислення показали, що для таких систем термонапруження $\sigma_r^{(1)}(r)$ та $\sigma_\varphi^{(1)}(r)$ дорівнюють один одному та залишаються постійними всередині стрижня 1, в той час як $\sigma_r^{(2)}(r)$ і $\sigma_\varphi^{(2)}(r)$ мають різні знаки та рівні за модулем.

Графіки зміни цих функцій представлені на рис. 20.

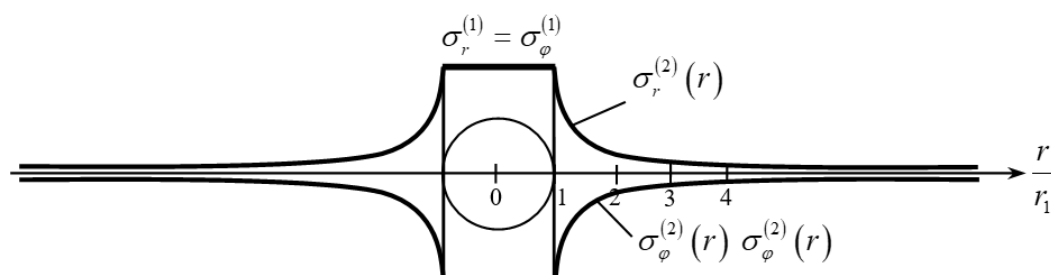


Рисунок 20 – Графіки зміни функцій $\sigma_r^{(1)}(r)$, $\sigma_\phi^{(1)}(r)$, $\sigma_r^{(2)}(r)$, $\sigma_\phi^{(2)}(r)$

Розрахунки проводились при відповідних значеннях термомеханічних параметрів армуючих стрижнів представлених в табл. 7

Таблиця 7 – Значення термомеханічних параметрів армуючих стрижнів

Вид арматури	E , ГПа	ν	$10^{-5} \alpha_{\text{нопер}}, 1/^{\circ}\text{C}$	$10^{-5} \alpha_{\text{новзд}}, 1/^{\circ}\text{C}$
Фіберглас (GFRP)	48	0,33	2,51	0,5
	56,52		2,25	0,443
	62			
Фіберкарбон (CFRP)	220	0,2	2,53	0,0113
	210		9,3	0,105
	500			- 0,02
Фібербазальт (BFRP)	40	0,25	5,1	0,518
	43		5,02	0,9
			5,56	
Фіберарамід (AFRP)	72	0,3 0,26	1,71	0,192

Значення цих параметрів для цементобетону складали: $E = 25 \div 50$ ГПа, $\nu = 0,1 \div 0,2$, $\alpha = 1 \cdot 10^{-5} 1/^{\circ}\text{C}$, та для асфальтобетону $E = 2,4$ ГПа, $\nu = 0,3$, $\alpha = 2 \cdot 10^{-5} 1/^{\circ}\text{C}$.

З рівнянь (30) та рис. 20 випливає, що напруження $\sigma_r^{(2)}(r)$ і $\sigma_\phi^{(2)}(r)$ мають максимальні значення на контактній поверхні $r = r_1$ і потім спадають пропорційно величині r^{-2} . Ця особливість відповідає принципу Сен-Венана, який реалізується в даному випадку, завдяки тому, що напруження $\sigma_r^{(2)}(r)$ на поверхні $r = r_1$ являють собою зрівноважену систему сил.

Умова термомеханічної сумісності матеріалів арматури та матриці має вигляд:

$$(1 + \nu_1) \alpha_1 - (1 + \nu_2) \alpha_2 = 0 \quad (31)$$

Якщо ця умова не виконується, в системі при зміні її температури на величину T виникають термонапруження, тим більше, чим більша різниця (31).

Виконаний числовий аналіз термомеханічної несумісності матеріалів асфальтобетону, цементобетону та арматур показав, що значення коефіцієнтів лінійного термічного розширення асфальтобетону та арматур мала (за виключенням матеріалу фібербазальту), тому при вибраному значенні зміни температури на -20°C внутрішньоструктурні термонапруження в асфальтобетоні невеликі.

Для матеріалів цементобетону (обчислення проводились для двох видів термомеханічних параметрів бетону) та арматур ця різниця суттєва, тому термонапруження в цьому матеріалі помітно перевищують границі міцності цементобетонів при розтягуванні. Ця особливість має бути врахована при проектуванні армованих цементобетонних конструкцій, що працюють в умовах змінних температур. Результати обчислень представлені в таблицях 8-10

Таблиця 8 – Значення термонапружень на поверхні $r = r_1$ асфальтобетонної матриці

Матеріал арматури	$\sigma_r^{(1)}(r_1)$, МПа	$\sigma_{\varphi}^{(1)}(r_1)$ МПа	$\sigma_r^{(2)}(r_1)$, МПа	$\sigma_{\varphi}^{(2)}(r_1)$, МПа
Фіберглас	0,26371	0,26371	0,26371	– 0,26371
Фіберкарбон	0,14680	0,14680	0,14680	– 0,14680
Фібербазальт	1,35742	1,35742	1,35742	– 1,35742
Фіберарамід	– 0,13739	– 0,13739	– 0,13739	0,13739

Таблиця 9 – Значення внутрішньоструктурних термонапружень в цементобетоні для першого варіанту його термомеханічних властивостей.

Матеріал арматури	$\sigma_r^{(1)}(r_1)$, МПа	$\sigma_{\varphi}^{(1)}(r_1)$ МПа	$\sigma_r^{(2)}(r_1)$, МПа	$\sigma_{\varphi}^{(2)}(r_1)$, МПа
Фіберглас	8,5436	8,5436	8,5436	– 8,5436
Фіберкарбон	8,03846	8,03846	8,03846	– 8,03846
Фібербазальт	18,0234	18,0234	18,0234	– 18,0234
Фіберарамід	4,38482	4,38482	4,38482	– 4,38482

Таблиця 10 – Значення внутрішньоструктурних термонапружень в цементобетоні для другого варіанту його термомеханічних властивостей.

Матеріал арматури	$\sigma_r^{(1)}(r_1)$, МПа	$\sigma_{\varphi}^{(1)}(r_1)$ МПа	$\sigma_r^{(2)}(r_1)$, МПа	$\sigma_{\varphi}^{(2)}(r_1)$, МПа
Фіберглас	13,2516	13,2516	13,2516	– 13,2516
Фіберкарбон	13,2021	13,2021	13,2021	– 13,2021
Фібербазальт	26,8582	26,8582	26,8582	– 26,8582
Фіберарамід	6,55362	6,55362	6,55362	– 6,55362

Для параметрів арматури та середовищ були вибрані наступні значення:

Фіберглас: $E_1 = 56$ ГПа, $\nu_1 = 0,33$, $\alpha_1 = \alpha_{\text{nonep}} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$;

Фіберкарбон: $E_1 = 220$ ГПа, $\nu_1 = 0,2$, $\alpha_1 = \alpha_{\text{nonep}} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$;

Фібербазальт: $E_1 = 43$ ГПа, $\nu_1 = 0,25$, $\alpha_1 = \alpha_{\text{nonep}} = 5,1 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$;

Фіберарамід: $E_1 = 72$ ГПа, $\nu_1 = 0,3$, $\alpha_1 = \alpha_{\text{нопер}} = 1,71 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$.

Асфальтобетон: $E_2 = 2,4$ ГПа, $\nu_2 = 0,3$, $\alpha_2 = 2 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$.

Цементобетон, випадок 1: $E_2 = 25$ ГПа, $\nu_2 = 0,1$, $\alpha_2 = 1 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$.

випадок 2: $E_2 = 50$ ГПа, $\nu_2 = 0,2$,

Розглянуті приклади визначення внутрішньоструктурних термонапружень в композитах з несумісними термомеханічними параметрами відносяться до випадків, коли температура в системі постійно однакова в усіх точках всіх фракцій.

Тому в розділі було також виконано теоретичне дослідження механізму зародження внутрішньоструктурних термонапружень в композитних матеріалах зі стрижневою арматурою, зумовлених структурною неоднорідністю системи, наявністю в ній сталих та змінних полів температури та несумісністю термомеханічних параметрів. Сформульовані системи звичайних диференціальних рівнянь для триточкових крайових задач з розривними коефіцієнтами. Виведені додаткові співвідношення для крайових умов і умов спряження шуканих функцій на інтерфейсній поверхні. В замкнених формах побудовані розв'язки поставленої задачі для пружних середовищ в неоднорідних полях температури.

Встановлено, що додаткові внутрішньоструктурні термонапруження концентруються на поверхні контакту між фазами композиту. Вони представляють собою систему сил з нульовим головним вектором та головним моментом і тому, у відповідності до принципу Сен Венана, їх вплив на термодетформований та напружений стан матриці спадає пропорційно величині r^{-2} , де r – радіальна координата.

Виконано дослідження явища зародження внутрішньоструктурних термонапружень в композитному матеріалі, що містить стрижневу арматуру з відмінними термомеханічними параметрами, при дії термічного збурення вздовж радіальної координати.

Сформульована триточкова система звичайних диференціальних рівнянь з додатковими умовами на краях області визначення розв'язку та константними рівняннями сумісності розв'язків на інтерфейсній поверхні. Побудовано розв'язок цієї системи, знайдені функції переміщень, деформацій і напружень для випадку зміни температури системи вздовж радіальної координати за експоненціальним законом.

Аналіз отриманих розв'язків показав, що поля термонапружень в системі в значній мірі визначаються показниками експоненти температури та їх вклад в термопошкодження системи може бути помітним.

У п'ятому розділі проведено теоретичне вивчення структури термонапруженого стану матеріалу матриці композиту в околі пори та капіляра в залежності від сумісності та несумісності термомеханічних характеристик (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, коефіцієнт температурного об'ємного розширення, крихкість або пластичність твердих фаз) двофазних систем матриця-вода та матриця-лід на етапах попереднього до замерзання, замерзання та закритичного зниження температури. При цьому враховувались особливі термомеханічні властивості води при її фазовому переході від рідкого стану в твердий, що пов'язані

з її нестисливістю, зміною знаку її коефіцієнту температурного об'ємного розширення при температурі 4°C ($3,98^{\circ}\text{C}$) та збільшенням об'єму при замерзанні.

Задачу про моделювання термопружного деформування матриці композиту в околі замкненої пори, заповненої охолодженою водою, сформульовано за допомогою сферичної моделі пори.

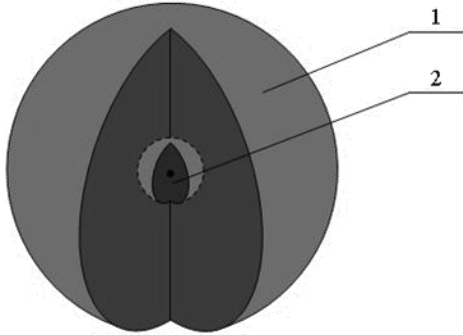


Рисунок 21 – Схема середовища з порою, заповненою водою

Параметри термопружності нескінченного пружного середовища 1 (рис. 21) складають E_1 – модуль пружності, ν_1 – коефіцієнт Пуассона, α_1 – коефіцієнт лінійного температурного розширення. В середовищі є сферична порожнина радіусу R , яка заповнена водою 2, що є абсолютно нестисливою з коефіцієнтами лінійного ($\alpha_2(T)$) та об'ємного ($\beta_2(T)$) термічного розширення, що залежать від температури T . Так як термомеханічні характеристики середовища 1 і води 2 різні, при зміні

температури T в них виникатимуть контактні термонапруження.

Покладено, що у вихідному стані температура середовища та води в порі становила 15°C . Потім вона стаціонарно зменшувалась до 0°C . Оскільки коефіцієнт α_2 змінюється з падінням T , дискретно підраховувались додаткові прирости термонапружень $\Delta\sigma^{(1)}$, $\Delta\sigma^{(2)}$ з кроком за температурою $\Delta T = -1^{\circ}\text{C}$ до $T = 0^{\circ}\text{C}$ та накопичували ці термонапруження. Далі обчислювали додаткові прирости напружень, що викликані замерзанням води, та додавали їх з термонапруженнями. Після цього підраховували загальний термонапружений стан системи середовище-лід при подальшому падінні температури.

При обчисленнях вважали, що середовище 1 знаходиться в середині сфери, радіус якої $r \rightarrow \infty$. Для розв'язання задачі використовувалась сферична система координат r, φ, θ з початком O в центрі порожнини. Термонапружений стан середовища 1 в цій системі визначається напруженнями $\sigma_r^{(1)}(r)$, $\sigma_\varphi^{(1)}(r)$, $\sigma_\theta^{(1)}(r)$, що діють на відповідних елементарних площадках $r = \text{const}$, $\varphi = \text{const}$, $\theta = \text{const}$, причому в силу сферичної симетрії задачі $\sigma_\varphi^{(1)}(r) = \sigma_\theta^{(1)}(r)$.

Рівняння рівноваги системи має вигляд:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 \Delta u^{(1)}) \right] = 0; \quad (r \geq R), \quad (32)$$

Це рівняння має розв'язок

$$\Delta u^{(1)}(r) = rC_1 + \frac{1}{r^2} C_2; \quad (r \geq R). \quad (33)$$

Константи C_1, C_2 , що сюди входять, визначаються із умови рівності радіальних переміщень пружного середовища 1 та води 2 на граничній поверхні $r = R$

$$\Delta u^{(1)}(r) = \Delta u^{(2)}(R) \quad (34)$$

та умови рівності нулю приростів радіальних напружень середовища 1 при $r \rightarrow \infty$

$$\Delta \sigma_r^{(1)}(r) \rightarrow 0 \quad \text{при } r \rightarrow \infty. \quad (35)$$

Оскільки вода є нестисливою рідиною, при температурних змінах об'ємів елементів середовищ 1 і 2 середовище 1 не буде чинити ніякого впливу на температурні переміщення $\Delta u^{(2)}(r)$ ($r \leq R$) води 2, і на поверхні $r = R$ додаткові переміщення, викликані приростом ΔT складуть $R\alpha_2(T)\Delta T$. Тут враховано, що α_2 є функція, що залежить від T .

Тоді умови (34), (35) можна переписати у вигляді

$$\begin{aligned} RC_1 + \frac{1}{R^2} C_2 &= R\alpha_2(T)\Delta T; \\ \frac{E_1}{(1-2\nu_1)} C_1 - \frac{2}{r^3} \frac{E_1}{1+\nu_1} C_2 - \frac{E_1}{(1-2\nu_1)} \alpha_1 \Delta T &\rightarrow 0 \quad \text{при } r \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (36)$$

Ця система має розв'язок

$$\begin{aligned} C_1 &= \alpha_1 \Delta T; \\ C_2 &= R^3 (\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T. \end{aligned} \quad (37)$$

В результаті виконаних перетворень отримали

$$\begin{aligned} \Delta u^{(1)}(r) &= r\alpha_1 \Delta T + \frac{R^3}{r^2} (\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T; \\ \Delta \varepsilon_r^{(1)}(r) &= \varepsilon_1 \Delta T - \frac{2R^3}{r^3} (\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T; \\ \Delta \varepsilon_\varphi^{(1)}(r) &= \alpha_1 \Delta T + \frac{R^3}{r^2} (\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T; \\ \Delta \sigma_r^{(1)}(r) &= -\frac{2R^3}{r^3} \frac{E_1}{(1+\nu_1)} (\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T; \\ \sigma_\varphi^{(1)}(r) &= \Delta \sigma_\theta^{(1)}(r) = \frac{R^3}{r^3} \frac{E_1}{(1+\nu_1)} (\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T. \end{aligned} \quad (38)$$

Відмітимо, що найбільші значення додаткових термонапружень $\Delta \sigma_\varphi^{(1)}$, $\Delta \sigma_\theta^{(1)} = \Delta \sigma_\theta^{(1)}$ в середовищі 1 мають місце на поверхні $r = R$ і вони спадають обернено пропорційно кубу координати r . Крім того напруження $\Delta \sigma_r^{(1)}(r)$ по модулю в два рази більше напружень $\Delta \sigma_\varphi^{(1)}(r)$ і $\Delta \sigma_\theta^{(1)}(r)$ і вони мають різні знаки.

Отримані розв'язки для наступних двох етапів: перетворення води у порох на лід та подальшого її замерзання показали, що функції термонапружень проявляють аналогічні властивості та їх обриси відповідають рис. 22.

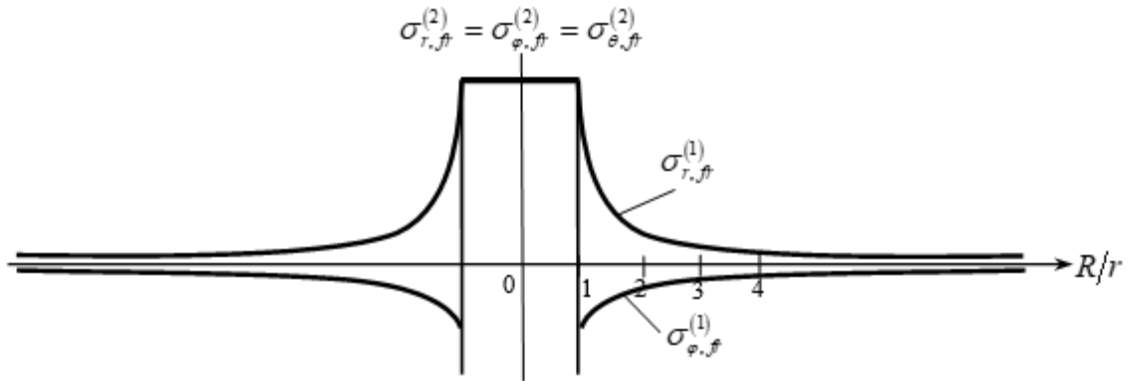


Рисунок 22 – Графіки розподілу термонапружень в пружному середовищі з порою, заповненою водою

Використовуючи отримані розв'язки були досліджені приклади появи термонапружень розтягування та стиснення, що викликані ефектом збільшення об'єму льоду при замерзанні води в порах в цементо- та асфальтобетонних будівельних матеріалах. Показано, що при міцності цементобетону при стисканні за температури від $+15^{\circ}\text{C}$ до 0°C $[\sigma_{1,comp}] = 20 \div 40$ МПа, обчислені локальні напруження, викликані замерзанням води в сферичній порі, складають $\sigma_{r,fr}^{(1)}(R) = -378,947$ МПа, $\sigma_{\varphi,fr}^{(1)}(R) = \sigma_{\theta,fr}^{(1)}(R) = 189,474$ МПа, $\sigma_{r,fr}^{(2)}(R) = \sigma_{\varphi,fr}^{(2)}(R) = \sigma_{\theta,fr}^{(2)}(R) = -378,947$ МПа, що набагато перевищують їх межі міцності. Ситуація повторюється і у випадку асфальтобетону, границя міцності якого при $T = 0^{\circ}\text{C}$ доходить до 12 МПа в той час, коли знайдені локальні напруження, викликані замерзанням води, складають $\sigma_{r,fr}^{(1)}(R) = -526,027$ МПа, $\sigma_{\varphi,fr}^{(1)}(R) = \sigma_{\theta,fr}^{(1)}(R) = 263,014$ МПа, $\sigma_{r,fr}^{(2)}(R) = \sigma_{\varphi,fr}^{(2)}(R) = \sigma_{\theta,fr}^{(2)}(R) = -526,027$ МПа. При цьому, концентрація напружень як в цементобетоні так і в асфальтобетоні (а тому і викликані ними руйнування) спадають обернено пропорційно кубу радіальної координати та в зв'язку з цим мають локальний (прихований) характер в зоні граничної поверхні пори, однак при повторних актах заморожування-відтавання вони можуть суттєво знижувати морозостійкість системи.

Досліджена проблема зародження термонапружень в цементобетонному середовищі в околі капіляра, частково або повністю заповненого водою. На основі теорії термопружності, для циліндричної моделі капіляра, сформульовані системи звичайних диференціальних рівнянь термодформування двофазних середовищ на трьох розглянутих етапах зміни температури. Для цих рівнянь побудовано розв'язки у замкнутій формі, які визначають поля термопереміщень, деформацій та напружень.

Розглянемо випадок деформування пружного середовища при заморожуванні води в його капілярі. При $T = 0^{\circ}\text{C}$ видалення тепла із системи із збереженням нульової температури супроводжуватиметься перетворенням води на лід та його розширенням. Проте лід, на відміну від води, є пружним середовищем, що стискається, тому збільшення обсягу замерзаючої води в капілярі буде також

супроводжуватися його попутним зменшенням внаслідок контактної взаємодії з пружним середовищем 1. Тому в деформованому стані рівновага системи описується двома рівняннями виду

$$\frac{d\Delta\sigma_r^{(i)}}{dr} + \frac{\Delta\sigma_r^{(i)} - \Delta\sigma_\varphi^{(i)}}{r} = 0; \quad (i=1,2), \quad (39)$$

де значення $i=1$ відповідає пружному середовищу 1, значення $i=2$ – пружному льодяному тілу.

При аналізі їх зручно виразити через прирости $\Delta u^{(i)}$ радіальних переміщень

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \Delta u^{(i)}) \right] = 0; \quad (i=1,2). \quad (40)$$

Розв'язок ситеми має вигляд

$$\Delta u^{(1)}(r) = rC_1 + \frac{1}{r}C_2; \quad \Delta u^{(2)}(r) = rC_3 + \frac{1}{r}C_4, \quad (41)$$

у якому константи C_1, C_2, C_3, C_4 знаходяться із граничних умов

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_r^{(1)}(r_2) &= 0 \quad \text{при} \quad r_2 \rightarrow \infty; \\ \Delta u^{(2)}(0) &= 0, \end{aligned} \quad (42)$$

та умов сполучення переміщень та напружень на контактній поверхні $r = r_1$

$$\begin{aligned} \Delta u^{(1)}(r_1) &= \Delta u^{(2)}(r_1), \\ \Delta\sigma_r^{(1)}(r_1) &= \Delta\sigma_r^{(2)}(r_1). \end{aligned} \quad (43)$$

Маючи значення констант C_1, C_2, C_3, C_4 можна побудувати функції переміщень та напружень

$$\begin{aligned} \Delta u^{(1)}(r) &= 0,03E_2(1+\nu_1)r_1^2/r \left[E_1(1+\nu_2)(1-2\nu_2) + E_2(1+\nu_1) \right]; \quad (r \geq r_1); \\ \Delta u^{(2)}(r) &= 0,03E_2(1+\nu_1) \cdot r / \left[E_1(1+\nu_2)(1-2\nu_2) + E_2(1+\nu_1) \right]; \quad (0 \leq r \leq r_1); \\ \Delta\sigma_r^{(1)}(r) &= -0,03E_1E_2 \cdot r_1^2/r^2 / \left[E_1(1+\nu_2)(1-2\nu_2) + E_2(1+\nu_1) \right]; \quad (r \geq r_1); \\ \Delta\sigma_\varphi^{(1)}(r) &= 0,03E_1E_2 \cdot r_1^2/r^2 / \left[E_1(1+\nu_2)(1-2\nu_2) + E_2(1+\nu_1) \right]; \quad (r \geq r_1); \\ \Delta\sigma_r^{(2)}(r) &= -0,03E_1E_2 / \left[E_1(1+\nu_2)(1-2\nu_2) + E_2(1+\nu_1) \right]; \quad (0 \leq r \leq r_1); \\ \Delta\sigma_\varphi^{(2)}(r) &= -0,03E_1E_2 / \left[E_1(1+\nu_2)(1-2\nu_2) + E_2(1+\nu_1) \right]; \quad (0 \leq r \leq r_1). \end{aligned} \quad (44)$$

В табл. 11 наведені значення приростів напружень $\Delta\sigma_r^{(1)}(r_1), \Delta\sigma_\varphi^{(1)}(r_1)$ в асфальтобетоні на поверхні $r = r_1$ в результаті заморожування води при різних рівнях V_{wat}/V_{cap} наповнення нею капіляра обчислені при термомеханічних параметрах системи: $E_1 = 15 ГПа$, $\nu_1 = 0,2$, $\alpha_1 = 0,1 \cdot 10^{-4} C^{-1}$, $[\sigma_{tens}^{(1)}] = 2 \div 5 МПа$, $[\sigma_{comp}^{(1)}] = 20 \div 40 МПа$; $E_2 = 8 ГПа$, $\nu_2 = 0,35$, $\alpha_2 = 0,5 \cdot 10^{-4} C^{-1}$, $[\sigma_{tens}^{(2)}] = 1,11 МПа$. Їхні величини.

Таблиця 11 – Значення приростів контактних напружень в середовищі цементобетону внаслідок замерзання води в його капілярі

	V_{wat}/V_{cap}	α_{fr}	$\Delta\sigma_r^{(1)}(r_1), \text{МПа}$	$\Delta\sigma_\varphi^{(1)}(r_1), \text{МПа}$
1	1	0,03	-229,7	229,7
2	0,99	0,0264	-202,1	202,1
3	0,98	0,0227	-173,8	173,8
4	0,97	0,0191	-146,2	146,2
5	0,96	0,0155	-118,7	118,7
6	0,95	0,0118	-90,34	90,34
7	0,94	0,0082	-67,78	67,78
8	0,93	0,00456	-34,91	34,91
9	0,92	0,00093	-7,12	7,12

Аналіз цих даних дозволяє зробити висновок, що при будь-якому заповненні капіляра водою, що перевищує 91%, колові напруження $\sigma_\varphi^{(1)}(r_1)$ є розтягуючими і перевищують межу міцності цементобетону. Якщо $V_{wat}/V_{cap} \leq 0,91$, то це напруження дорівнює нулю.

Загальний аналіз побудованих розв'язків свідчить про те, що на всіх етапах зміни температури термонапруження, що виникають в цементобетонному середовищі, концентруються в малому околі поверхні контакту і зменшуються обернено пропорційно квадрату радіальної координати. Функції радіальних та колових термонапружень рівні за модулем, але мають протилежні знаки. У зв'язку з цим на будь-яких етапах зміни температури одне з цих напружень є розтягуючим, що є основною причиною можливого локального тріщиноутворення та виникнення пошкоджень.

Оскільки унікальні показники міцності та твердості карбонових нанотрубок і фулеренів роблять їх вельми перспективними армуючими домішками в композитні матеріали на основі полімерних та металевих матриць у шостому розділі поставлено та досліджено задачі про концентрацію термонапружень в полімерних матеріалах армованих карбоновими нанотрубками та фулеренами.

На базі методів термопружності була поставлена задача про зародження внутрішньоструктурних термонапружень в полімерних матеріалах, що армовані карбоновими нанотрубками в умовах зміни в них однорідних і неоднорідних полів температур. Для опису термодетормування нанотрубки використовувалась модель циліндричної оболонки зі зведеними параметрами товщини, модуля пружності, коефіцієнта Пуасона і коефіцієнта лінійного термічного розширення, полімерна матриця розглядається як пружне середовище. Сформульована система розв'язувальних рівнянь, побудовані її розв'язки в замкненій формі.

В табл. 12 представлені результати обчислень внутрішньоструктурних термонапруження в матрицях, що складаються з епоксидної смоли, поліаміду, фенолформальдегіду, поліефіру, полікарбонату, полістирола і поліпропілену для випадку однорідного температурного поля.

Таблиця 12 – Значення параметрів термонапруженого стану системи при однорідному полі температур

№ п.п.	Полімерний матеріал матриці	r_1 нм	$10^4 u_1$ нм	$10^2 N_\varphi$ Н/м	N_z Н/м	$\sigma_r^{(2)}(r_1)$ МПа	$\sigma_\varphi^{(2)}(r_1)$ МПа	$\sigma_z^{(2)}(r_1)$ МПа
1	Епоксидна смола	1	6,190	0,7125	-0,1785	7,113	-7,113	-18,11
		5	40,32	8,372	-0,1633	6,912	-6,912	-18,11
2	Поліамід	1	6,241	0,8989	-0,1782	8,994	-8,994	-28,61
		5	35,86	4,397	-0,1712	8,291	-8,291	-28,61
3	Фенолформальдегід	1	6,101	0,3784	-0,1792	3,784	-3,784	-7,839
		5	32,44	1,832	-0,1763	3,663	-3,663	-7,839
4	Поліефір	1	6,463	1,736	-0,1765	17,67	-17,67	-45,75
		5	41,16	8,933	-0,1638	16,74	-16,74	-45,75
5	Полікарбонат	1	6,176	0,6619	-0,1792	6,619	-6,619	-17,64
		5	34,33	3,249	-0,1654	6,499	-6,499	-17,64
6	Полістирол	1	5,734	0,9836	-0,1780	9,837	-9,837	-23,56
		5	36,39	4,795	-0,1704	9,591	-9,591	-23,56
7	Поліпропілен	1	6,228	0,8551	-0,2156	8,611	-8,611	-32,99
		5	35,66	4,243	-0,1715	8,486	-8,486	-32,99

Обчислення проводились за формулами, що наведені нижче.

Переміщення елементів серединної поверхні циліндричної оболонки нанотрубки в повздовжньому напрямі:

$$u_1 = u^{(2)}(r_1), \quad (45)$$

мембранні зусилля в оболонці нанотрубки:

$$\begin{aligned} N_z &= \frac{E_1 h}{1 - \nu_1^2} \left[\frac{dv_1}{dz} + \nu_1 \frac{u_1}{r_1} - (1 + \nu_1) \alpha_1 T \right]; \\ N_\varphi &= \frac{E_1 h}{1 - \nu_1^2} \left[\frac{u_1}{r_1} + \nu_1 \frac{dv_1}{dz} - (1 + \nu_1) \alpha_1 T \right]; \end{aligned} \quad (46)$$

радіальні переміщення:

$$u^{(2)}(r) = rC_1 + \frac{1}{r}C_2, \quad (47)$$

де C_1 , C_2 – константи інтегрування знаходились з умов контактної взаємодії середовища 2 з оболонкою 1 і прямування напруження $\sigma_r^{(2)}(r)$ до нуля при $r \rightarrow \infty$.

Функції радіальних та колових напружень середовища 2:

$$\begin{aligned}
\sigma_r^{(2)}(r) &= \frac{2E_1h\mu_2}{r^2(1-\nu_1)} \left[\frac{(3\lambda_2+2\mu_2)}{2(1+\nu_1)(\lambda_2+\mu_2)} \alpha_2 T - \alpha_1 T \right] \bigg/ \left[\frac{E_1h}{r_1^2(1-\nu_1^2)} + \frac{2\mu_2}{r_1} \right]; \\
\sigma_\varphi^{(2)}(r) &= -\frac{2E_1h\mu_2}{r^2(1-\nu_1)} \left[\frac{(3\lambda_2+2\mu_2)}{2(1+\nu_1)(\lambda_2+\mu_2)} \alpha_2 T - \alpha_1 T \right] \bigg/ \frac{E_1h}{r_1^2(1-\nu_1^2)} + \frac{2\mu_2}{r_1}; \\
\sigma_z^{(2)}(r) &= \frac{\lambda_2(3\lambda_2+2\mu_2)}{2(\lambda_2+\mu_2)} \alpha_2 T - (3\lambda_2+2\mu_2) \alpha_2 T.
\end{aligned} \quad (48)$$

При цьому вважалось, що зміна температури $T = 50^\circ \text{C}$, термомеханічні параметри для оболонкової моделі решітчастої стінки нанотрубки складали: $E_1h = 360 \text{ Н/м}$ (мембранна жорсткість), $\nu_1 = 0,2$, $\alpha_1 = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ C}^{-1}$, $r_1 = 5 \text{ нм}$ (радіус нанотрубки). Термомеханічні параметри матеріалів (найбільш характерні значення) за яких проводились розрахунки подано в Табл.13.

Таблиця 13 – Термомеханічні параметри вибраних полімерних матеріалів

№ п.п	Полімерний матеріал	λ , ГПа	μ , ГПа	$[\sigma]_{\text{міц}}$, МПа	$10^5 \alpha \text{ C}^{-1}$
1	Епоксидна смола	2,8	1,3	40-80	5
2	Поліамід	3,76	1,06	50-90	7
3	Фенелформальдегід	1,18	1,56	48	3
4	Поліефір	4,73	1,84	10-129	7,9
5	Полікарбонат	2,25	0,87	66	6,5
6	Полістирол	2,58	1,21	46	7
7	Поліпропілен	2,40	0,46	31-41	14

В Табл. 14 представлені результати обчислень для випадку неоднорідного температурного поля.

Таблиця 14 – Значення параметрів термонапруженого стану системи при неоднорідному полі температур

№ п.п.	Полімерний матеріал матриці	r_1 нм	$10^4 u_1$ нм	$10^2 N_\varphi$ Н/м	N_z Н/м	$\sigma_r^{(2)}(r_1)$ МПа	$\sigma_\varphi^{(2)}(r_1)$ МПа	$\sigma_z^{(2)}(r_1)$ МПа
1	Поліамід	1	3,256	0,9624	-0,088	9,604	-9,604	-14,92
		5	21,28	4,706	-0,0805	9,412	-9,412	-14,92
2	Поліефір	1	3,493	1,848	-0,1073	18,48	-18,48	-45,17
		5	26,85	8,896	-0,086	17,79	-17,79	-45,17
3	Поліпропілен	1	3,236	0,8844	-0,088	8,844	-8,844	-32,99
		5	20,84	4,350	-0,081	8,759	-8,759	-32,99

Обчислення здійснювались для випадку коли приріст температури середовища 2 склав $T = 50^\circ \text{C}$, а температура нанотрубки в наслідок слабкої теплопередачі через її бічну поверхню змінилась тільки на $T_1 = 25^\circ \text{C}$. Були вибрані матеріали, для яких прирости напружень в Табл.11 виявились найбільшими.

Для неоднорідного температурного поля формули (46) та (48) перепишуться у вигляді:

$$\begin{aligned} N_{\varphi} &= \frac{E_1 h}{1 - \nu_1^2} \left[\frac{u_1}{r_1} - (1 + \nu_1) \alpha_1 T_1 \right]; \\ N_z &= \frac{E_1 h}{1 - \nu_1^2} \left[\nu_1 \frac{u_1}{r_1} - (1 + \nu_1) \alpha_1 T_1 \right]; \end{aligned} \quad (49)$$

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(2)}(r) &= \frac{2E_1 h \mu_2}{r^2 (1 - \nu_1)} \left[\frac{C_1}{(1 + \nu_1)} - \alpha_1 T_1 \right] \bigg/ \left[\frac{E_1 h}{r_1^2 (1 - \nu_1^2)} + \frac{2\mu_2}{r_1} \right]; \\ \sigma_{\varphi}^{(2)}(r) &= -\frac{2E_1 h \mu_2}{r^2 (1 - \nu_1)} \left[\frac{C_1}{(1 + \nu_1)} - \alpha_1 T_1 \right] \bigg/ \left[\frac{E_1 h}{r_1^2 (1 - \nu_1^2)} + \frac{2\mu_2}{r_1} \right]; \\ \sigma_z^{(2)}(r) &= \lambda_2 C_1 - (3\lambda_2 + 2\mu_2) \alpha_2 T_2. \end{aligned} \quad (50)$$

Виконані дослідження свідчать про те, що в наслідок несумісності термомеханічних параметрів карбонових нанотрубок і полімерних матеріалів при зміні температур фаз композиту на їх основі, використання нанотрубок в якості арматури може призводити не тільки до збільшення механічної міцності системи, але також і до зародження на інтерфейсних поверхнях додаткових концентраторів внутрішньоструктурних термонапружень, які при спільній дії з експлуатаційними навантаженнями можуть викликати локальні нанопшкодження.

Також у розділі була поставлена задача про теоретичне виявлення ефектів зародження внутрішньоструктурних термонапружень в полімерних композитах, армованих вуглецевими фулеренами, в умовах зміни температури системи. Для опису процесу термічного деформування решітчастої сферичної наномолекули використовувалась математична модель тонкої пружної сферичної оболонки зі зведеними характеристиками її товщини, модуля пружності, коефіцієнта Пуассона та коефіцієнта лінійного термічного розширення. Полімерна матриця розглядається як однорідне пружне середовище. За допомогою методів термопружності сформульована система звичайних диференціальних рівнянь термдеформування композитів армованих вуглецевими фулеренами, в умовах зміни температури системи та за умови контактної механічної взаємодії фракцій композиту на інтерфейсній поверхні їх супряження. В замкненій формі побудовані розв'язки цих рівнянь, які характеризують пружне переміщення, деформації та напруження у фракціях композиту при заданих значеннях їх термомеханічних параметрів.

За виведеними формулами, було проведено розрахунки термдеформованих станів полімерних матеріалів, армованих фулеренами, зумовлених термомеханічною несумісністю параметрів матриці та арматури. Термомеханічні параметри для фулерену складали: $r_1 = 0,35$ і $0,8$ нм, $E_1 h_1 = 330$ Н/м, $\nu_1 = 0,18$, $\alpha_1 = 1,0 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹, температура системи змінювалась на величину $T = 100^\circ$ С. Термомеханічні параметри матеріалів наведено вище в Табл. 13. Результати обчислень представлені в таблиці 15.

Таблиця 15 – Значення параметрів термонапружених станів системи

	Полімерний матеріал матриці	r_1 нм	$10^3 u_1$ нм	q_r МПа	$10^3 N_\varphi$ Н/м	$10^3 u_2(r_1)$ нм	$\sigma_r^{(2)}(r_1)$ МПа	$\sigma_\varphi^{(2)}(r_1)$ МПа
1	Фенол-формальдегід	0,35	0,3519	12,45	2,179	0,3519	12,45	-6,226
		0,8	0,8099	12,40	4,961	0,8099	12,40	-6,202
2	Епоксидна смола	0,35	0,3532	20,75	3,632	0,3532	20,75	-10,38
		0,8	0,8165	20,63	8,253	0,8165	20,63	-10,34
3	Полікарбонат	0,35	0,3529	19,11	3,344	0,3529	19,11	-9,555
		0,8	0,8152	19,07	7,630	0,8152	19,07	-9,537
4	Поліамід	0,35	0,3539	25,39	4,443	0,3539	25,39	-12,69
		0,8	0,8201	25,33	10,133	0,8201	25,33	-12,66
5	Полістирол	0,35	0,3544	28,98	5,071	0,3544	28,98	-14,49
		0,8	0,8230	28,90	11,56	0,8230	28,90	-14,45
6	Поліефір	0,35	0,3577	50,62	8,859	0,3577	50,62	-25,31
		0,8	0,8401	50,42	20,17	0,8401	50,42	-25,21
7	Поліпропілен	0,35	0,3536	23,90	4,182	0,3536	23,90	-11,95
		0,8	0,8190	23,88	9,551	0,8190	23,88	-11,94

Обчислення проводились за формулами:

$$u_1 = \frac{(1-\nu_1)q_r r_1^2}{2E_1 h_1} + \alpha_1 r_1 T = \alpha_2 r_1 T + \frac{1}{r_1^2} C_2. \quad (51)$$

$$N_\theta = N_\varphi = \frac{E_1 h_1}{1-\nu_1} \left(\frac{u_1}{r_1} - \alpha_1 T \right) = \frac{q_r r_1}{2}. \quad (52)$$

$$C_2 = (\alpha_1 - \alpha_2) r_1^3 T / \left[\frac{2(1-\nu_1)\mu_2 r_1}{E_1 h_1} + 1 \right]; \quad (53)$$

$$q_r = -4\mu_2 (\alpha_1 - \alpha_2) T / \left[\frac{2(1-\nu_1)\mu_2 r_1}{E_1 h_1} + 1 \right].$$

Радіальне напруження q_r і константа C_2 визначались з умов контактної взаємодії тіла 1 та середовища 2 на поверхні $r = r_1$

$$\begin{aligned} u_1 &= u_2(r_1); \\ q_r &= \sigma_r^{(2)}(r_1), \end{aligned} \quad (54)$$

та умови рівності нулю термонапруження $\sigma_r^{(2)}(r)$ на нескінченності:

$$\sigma_r^{(2)}(r) \rightarrow 0 \text{ при } r \rightarrow \infty. \quad (55)$$

$$u_2(r) = r\alpha_2 T + \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)r_1^3 T}{r^2} / \left[\frac{2(1-\nu_1)\mu_2 r_1}{E_1 h_1} + 1 \right]. \quad (56)$$

$$\sigma_r^{(2)}(r) = -\frac{4\mu_2 r_1^3 (\alpha_1 - \alpha_2) T}{r^3} \left/ \left[\frac{2(1-\nu_1)\mu_2 r_1}{E_1 h_1} + 1 \right] \right.;$$

$$\sigma_\varphi^{(2)}(r) = \sigma_\theta^{(2)}(r) = \frac{2\mu_2 r_1^3 (\alpha_1 - \alpha_2) T}{r^3} \left/ \left[\frac{2(1-\nu_1)\mu_2 r_1}{E_1 h_1} + 1 \right] \right. \quad (57)$$

При заданій порівняно невеликій зміні температури $T=100^\circ\text{C}$ обчислені напруження не досягли своїх граничних значень $[\sigma]_{\text{міц}}$ (див. Табл.12), крім можливо позиції 6. Однак при $T=200^\circ\text{C}$ (також допустимого значення для полімерів) і його перевищення заграничні термонапруження можуть виникнути в епоксидній смолі, поліаміді, полістиролі, поліефірі та поліпропілені.

Більш повне уявлення про небезпеку заграничних термонапружень може бути сформовано в результаті розгляду функцій (57) їх розподілення в тілі матриці в радіальному напрямі (рис.23).

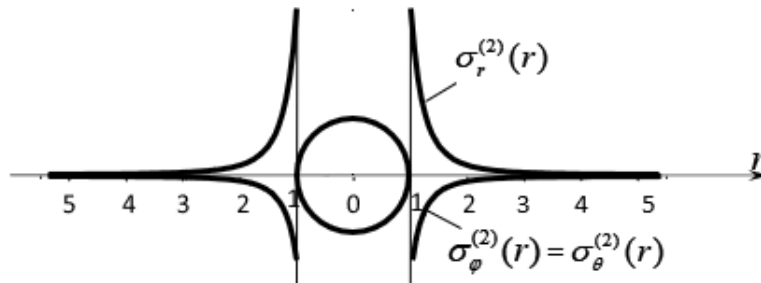


Рисунок 23 – Функції розподілення термонапружень в матеріалі матриці

Вони спадають обернено пропорційно кубу відстані від центра сфери 1 і виявляються практично невідчутними на відстані r_1 від її поверхні. Тому, якщо навіть обчислені величини внутрішньоструктурних термонапружень перевищили їх границі міцності, то викликані ними тріщини мають довжини, що складають лише частку нанометра і вони сконцентровані в нано зоні в околі тіла фулерену. Крім того в результаті виникнення нанотріщин знімаються деформаційні несумісності і внутрішньоструктурні термонапруження перетворюються на нуль. При цьому, однак, губиться адгезія між тілом матриці та фулереном і його роль в армуванні композита стає нікчемною.

Встановлено, що навіть порівняно невеликі за масою фулеренові включення можуть суттєво підвищити фізико-механічні показники полімерів. Показано, що суттєва різниця значень термомеханічних характеристик полімерних матриць та армованих фулеренів може призводити до несумісності термічних деформацій в композиті та виникненню в ньому значних внутрішньоструктурних напружень, які з підвищенням температури системи можуть досягати і навіть перевищувати границі міцності її матеріалу. При цьому, однак, зони концентрації цих напружень локалізуються в околах інтерфейсних поверхонь, а глибини проникнення викликаних ними пошкоджень не перевищують одного нанометра.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-практичної проблеми встановлення закономірностей термонапруженого і термодетформованого станів шаруватих конструкцій дорожнього одягу доріг та мостів з урахуванням впливу несумісності термомеханічних параметрів матеріалів при зміні температури та на основі цього удосконалення таких конструкцій, а також удосконалення покриттів, армованих металевими і неметалевими стрижнями та неоднорідними включеннями, за рахунок раціонального підбору термомеханічних параметрів їх елементів, що мінімізує або виключає їх деформативну несумісність при температурних впливах в умовах сезонних та добових змін температури в Україні.

1. На основі аналізу механічних і математичних особливостей проблеми термопружного деформування шаруватих конструкцій дорожнього одягу доріг і мостів встановлено, що внутрішні та комбіновані механізми терморуйнувань особливо часто проявляються в композитах, в яких термомеханічні властивості зв'язуючого та наповнювача мають термомеханічну несумісність. Вони особливо помітні в композитах, які не можуть вільно подовжуватися і скорочуватися у поздовжньому напрямку при збільшенні та зменшенні температури і в яких модулі пружності, коефіцієнти Пуассона та коефіцієнти лінійного температурного розширення мають різні значення.

Проведене моделювання задачі про виникнення термічних поздовжніх розтягуючих напружень та дотичних напружень у верхньому шарі асфальтобетонного покриття дороги показало, що причиною його відшарування може бути концентрація дотичних напружень на краях дороги. Причому встановлено, що рівень цих напружень не зменшується зі збільшенням товщини шару. В зв'язку з цим зроблено висновок, що зменшивши товщину цього шару на краях можна уникнути несумісності модулів пружності, коефіцієнтів Пуассона та коефіцієнтів термічного розширення контактуючих шарів. Показано також, що значення термонапружень зменшується зі зменшенням коефіцієнтів розширення.

2. За допомогою розробленої обчислювальної системи виконано розрахунки концентрації термонапружень в шаруватих конструкціях дорожнього одягу дороги під час добової зміни температури. Встановлено, що пікові значення поздовжніх напружень розтягу у верхньому шарі покриття і зсувних напружень, локалізованих між першим і другим шарами, можуть бути причиною спостережуваних на практиці в зимовий час утворення на дорозі на початковій стадії руйнування поперечних тріщин і її розшарування. Отримані результати дозволяють сформулювати основні закономірності формування полів термопружних напружень. До найпомітнішого явища можна віднести утворення крайового ефекту у функції розподілу температури. У зв'язку з цим суміщення гладкої неоднорідності температурного поля і шаруватої неоднорідності термомеханічних властивостей фрагментів покриття приводить до концентрацій напружень, які є розривними функціями і змінюють свої знаки при еволюції температурного поля. Вони також значною мірою залежать від наявності обмежень, що перешкоджають вільному термопружному розширенню-звуженню окремих фрагментів системи. В зв'язку з цим можна прийти до висновку, що змінюючи термомеханічні параметри кожного із

шарів дорожнього одягу можна цілеспрямовано змінювати в них поля температур і напружень, оптимізуючи конструктивні характеристики дороги.

3. Проведене теоретичне моделювання термонапружень у композитах які містять сферичні включення, яке показало, що додаткові внутрішні термонапруження концентруються на контактній сферичній поверхні, радіальні та колові термонапруження рівні за модулем, мають різні знаки і зменшуються пропорційно кубу радіальної координати. Такі поля термонапружень особливо несприятливі для крихкого матеріалу матриці, який погано чинить опір розтягуючим напруженням, що в даному випадку обов'язково реалізуються як для додатних, так і від'ємних приростів температури. Отримані аналітичні вирази для термонапружень дозволяють досліджувати міцність асфальтобетонів з мінеральними наповнювачами.

На базі отриманих розв'язків диференціальних рівнянь, що описують термопружне деформування асфальтобетонних матеріалів з гумовими включеннями в умовах температурних змін встановлені причини пришвидшеної деградації асфальтобетонних покриттів з гумовими включеннями, що пов'язані з механічною несумісністю гуми та широкими межами зміни її коефіцієнта термічного розширення. За допомогою аналітичних обчислень продемонстровано, що пом'якшення додаткових термомеханічних дефектів та їх усунення можна досягти за рахунок зниження термомеханічної несумісності властивостей фаз композиту шляхом бітумного модифікування гуми. При цьому ефективність цього способу підвищується зі збільшенням глибини проникнення модифікованого шару в гумове зерно.

4. За результатами математичного моделювання проблеми концентрації внутрішньоструктурних термонапружень у композиті з трубчастою, стрижневою та волокнистою арматурою, яке здійснювалось на основі методів термопружності з застосуванням моделі пружного середовища з циліндричним включенням встановлено, що зміна температури в такій системі супроводжується генеруванням додаткових внутрішніх радіальних та колових термонапружень у матеріалі матриці. Ці напруження концентрується на поверхні контакту матриці та арматури і швидко зменшуються пропорційно квадрату радіальної координати. При цьому при суттєвій термомеханічній несумісності матеріалів матриці та арматури ці додаткові термонапруження можуть значно перевищувати межі міцності матеріалу матриці та приводити до її локальних пошкоджень та руйнувань.

5. Подані оцінки переваг та недоліків матеріалів з фібергласовою, фіберкарбоною, фібербазальною, фіберарамідною арматурами. Результати обчислень внутрішньоструктурних термонапружень в армованому відповідними видами стрижнів асфальтобетонному середовищі при зміні температури системи на -20°C і вибраних значеннях параметрів арматури показали, що отримані значення термонапружень є співставними з межами міцності асфальтобетону, однак, в найменш сприятливих умовах виявляється система з фібербазальною арматурою, що володіє високим значенням КЛТР. Оскільки в цьому випадку $\alpha_1 > \alpha_2$, радіальні напрямки в матриці виявились розтягуючими, а колові – стискаючими. Тому в критичному стані асфальтобетон відривається від стрижня та зв'язок між ними

втрачається. В той же час, проведені аналогічні дослідження для двох марок цементобетону показали, що для обох цих видів тільки колові термонапруження в цементобетоні виявились стискаючими, а всі інші напруження (в тому числі й радіальні напруження в цементобетоні) – розтягуючими і для всіх видів арматури вони помітно перевищують (в 2, а для деяких видів в 4 рази) границі міцності цементобетону. У зв'язку з цим можна зробити висновок, що при розглянутих умовах в малому околі армуючого стрижня завжди будуть виникати локалізовані пошкодження у вигляді колових та радіальних тріщин, що прибирають механічний зв'язок між арматурою та матрицею. Цей зв'язок частково може зберігатись, якщо арматура рифлена та конструктивно скомбінована у вигляді сіток чи решіток. Відмічені негативні ефекти можна пояснити суттєвим перевищенням (в 2, а для фібербазальту в 5 разів) значень термічного розширення всіх видів арматури цієї величини цементобетону. Як видно, всі вони мають бути прийнятими до уваги при будівництві цементобетонних споруд в регіонах з великими сезонними перепадами температури.

6. Розроблено теоретичні моделі термонапруженого моделювання цементобетонних та асфальтобетонних матеріалів з порами і капілярами, частково або повністю заповнених водою. За допомогою методів математичного моделювання на базі теорії термопружності отримані в замкненій формі аналітичні вирази, що пов'язують параметри термодетформованого стану системи з термомеханічними параметрами її фаз на етапах зниження температури води, її замерзання і подальшого зменшення температури. Моделювання проведено з урахуванням специфічних властивостей води та їх зміни зі зміною температури. Так, вода є рідкою, з технічної точки зору, абсолютно нестисливим середовищем. При температурі, яка перевищує $T = +4^{\circ}\text{C}$, вона має змінний додатний коефіцієнт об'ємного температурного (а тому і лінійного) розширення. При $T = +4^{\circ}\text{C}$ цей коефіцієнт перетворюється на нуль, і при $T < +4^{\circ}\text{C}$ він стає від'ємним. При $T = 0^{\circ}\text{C}$ вода перетворюється на лід, об'єм якого на 9% більший об'єму води і який на відміну від неї є пружним тілом, що стискається. Як показали обчислення, вже на цьому етапі термонапруження в матриці, які викликані збільшенням об'єму замерзаючого льоду, навіть при неповному заповненні водою внутрішніх порожнин матриці (але який перевищує 91% їх об'єму) набагато перевищують межі міцності як асфальтобетону, так і цементобетону. При подальшому зниженні температури лід у мікропорожнинах поводить себе як звичайне пружне тіло з відповідними значеннями модуля пружності, коефіцієнта Пуассона та додатного коефіцієнта температурного лінійного розширення. Оскільки в результаті часткових руйнувань матриці в околі вихідних порожнин їх об'єм збільшився, подальші відлиги і заморозки, що повторюються, інтенсифікують ефекти мікроруйнувань матриці і явище її мікророзтріскування і мікроруйнування стає глобальним.

7. Використовуючи розроблені моделі та методи визначення внутрішньоструктурних термонапружень в полімерних матеріалах, армованих карбоновими нанотрубками було проведено розрахунки термонапруженого стану матриць, що складаються з епоксидної смоли, поліаміду, фенолформальдегіду, поліефіру, полікарбонату, полістирола і поліпропілену в умовах зміни в них однорідних і неоднорідних полів температур. Розглянуто два випадки, коли

температура всієї системи змінилась на 50°C і коли температура стінки нанотрубки змінилась на 25°C , а матеріал матриці додатково нагрівся на 50°C . В обох випадках найбільші значення радіальних і колових термонапружень в матриці реалізуються на інтерфейсній поверхні, вони однакові за абсолютною величиною, мають різні знаки та спадають обернено пропорційно квадрату радіуса. При цьому термонапруження, орієнтовні в осьовому напрямі, значно перевищують радіальні та колові термонапруження. Двократне зменшення температури нанотрубки, в другому випадку, призвело до майже двократного зменшення її радіальних переміщень. При цьому колові зусилля змінились несуттєво, а радіальні та колові термонапруження в середовищі матриці зросли від 4% до 14%. Отримані результати показали, що в наслідок несумісності термомеханічних параметрів карбонових нанотрубок і полімерних матеріалів при зміні температур фаз композиту на їх основі, використання нанотрубок в якості арматури може призводити не тільки до збільшення механічної міцності системи, але також і до зародження на інтерфейсних поверхнях додаткових концентраторів внутрішньоструктурних термонапружень, які при спільній дії з експлуатаційними навантаженнями можуть викликати локальні нанопшкодження.

Дослідження термодетформованих станів полімерних матеріалів, армованих фулеренами, зумовлених термомеханічною несумісністю параметрів матриці та арматури показали, що для різних полімерних матеріалів суттєва різниця значень термомеханічних характеристик полімерних матриць та армованих фулеренів може призводити до несумісності термічних деформацій в композиті та виникненню в ньому значних внутрішньоструктурних напружень, які з підвищенням температури системи можуть досягати і навіть перевищувати границі міцності її матеріалу. При цьому, однак, зони концентрації цих напружень локалізуються в околах інтерфейсних поверхонь, а глибини проникнення викликаних ними пошкоджень не перевищують одного нанометра.

8. Моделювання концентрації внутрішньоструктурних термонапружень в шаруватих конструкціях дорожнього одягу доріг та мостів дозволить понизити їх рівень та уникнути утворення локальних дефектів, тріщин, розшарувань і деструкцій. Це дасть змогу за рахунок підвищення міцності і довговічності конструкцій дорожнього одягу значно зменшити витрати на їх ремонти, що сприятиме забезпеченню сталого розвитку України. Багатоваріантні цілеспрямовані розрахунки на міцність та дослідження дорожньої конструкції при різних значеннях її геометричних та фізико-математичних параметрів дають змогу згладити концентратори напружень і деформацій та підвищити довговічність системи. Це дозволить успішно вирішувати проблеми відновлення та розвитку мережі автомобільних доріг України, оцінювати експлуатаційний стан доріг, раціонально розподіляти ресурси на їх утримання, а також більш точно прогнозувати міцність і довговічність дорожнього одягу, оцінювати ефективність проектних рішень та застосування нових матеріалів і технологій.

9. За результатами роботи отримано охоронні документи: Патент на корисну модель № 155834 «Спосіб виключення ефекту термосилового відшарування асфальтобетонного покриття від крайових ділянок жорсткої основи дороги або мосту

при температурних змінах»; Патент на корисну модель № 152211 «Спосіб зменшення додаткових контактних термонапружень в асфальтобетонних дорожніх покриттях, армованих стрижнями, при несумісності термомеханічних параметрів матеріалів конструкції в умовах температурних впливів»; Патент на корисну модель № 149263 «Спосіб виключення критичних напружень в зоні поперечного розвантажуючого розрізу багатошарового асфальтобетонного дорожнього покриття»; Свідоцтво про право автора на твір: комп'ютерна програма «Комп'ютерний аналіз впливу вертикальних тріщин та розшарувань в дорожньому покритті на поля деформацій та напружень в його конструкції» Свідоцтво про право автора на твір: «Математичні формули для обчислення додаткових термонапружень в армованих дорожніх покриттях при термомеханічній несумісності матеріалів покриття і арматури»; Свідоцтво про право автора на твір: Комп'ютерна програма «Комп'ютерний аналіз впливу термомеханічних характеристик матеріалів дорожнього покриття на його термонапружений стан».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографії:

1. Гуляєв В.І., Гайдайчук В.В., Мозговий В.В., Густєлев О.О., Заєць Ю.О., Шевчук Л.В., Шлюнь Н.В. Термопружний стан багатошарових дорожніх покриттів. НТУ. Київ. 2018. 252 с. ISBN 978-966-632-299-2 (*Особистий внесок автора: досліджено причини появи поперечних тріщин у верхньому шарі дорожнього покриття в зимовий час; проаналізовано вплив викривлення на перерозподіл полів напружень під дією температурних збурень*).

2. Гуляєв В.І., Мозговий В.В., Шлюнь Н.В., Заєць Ю.О., Білобрицька О.І., Шевчук Л.В., Внутрішньоструктурні термонапруження в композитних матеріалах з термомеханічно несумісними параметрами їх фракцій. Київ: Вид. Ліра-К, 2023. 302 с. ISBN 978-617-520-680-5 (*Особистий внесок автора: розробка математичних моделей термопружного деформування і руйнування композитних, асфальтобетонних та цементобетонних матеріалів; виведення диференціальних рівнянь та їх розв'язування*).

3. Gulyayev, V., Glazunov, S., Glushakova, O., Vashchilina, E., Shevchuk, L., Shlyun, N., Andrusenko, E. Modelling Emergency Situations in the Drilling of Deep Boreholes. Cambridge Scholars Publishing. 2019. ISBN(10): 1-5275-4020-0, ISBN(13): 978-1-5275-4020-0 (*Особистий внесок автора: постановка та розв'язання задач 7-го розділу монографії*)

4. Gulyayev, V.I., Shlyun, N.V. Singularly perturbed problems of drill string buckling in deep curvilinear borehole channels. Modern Trends in Structural and Solid Mechanics 1. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc. 2021, pp. 177-200. ISBN(10): 1-5275-4020-0, ISBN(13): 978-1-5275-4020-0 ISBN: 978-1-78630-714 (*Особистий внесок автора: комп'ютерне моделювання сингулярно-збуреної задачі, графічне представлення отриманих результатів*.) **Scopus**

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

5. Gulyayev V.I., Shlyun N.V. and Zaets Yu.O. Spiral Buckling of Torque and

Axial Force-Prestressed Nanotubes. *Strength of Materials*. 2024. 56(1). pp. 62–69. (Особистий внесок автора: розроблено математичну модель для визначення критичних станів та форм біфуркаційного випинання нанотрубок, напружених поздовжньою силою та крутним моментом). DOI:[10.1007/s11223-024-00627-7](https://doi.org/10.1007/s11223-024-00627-7)

Scopus Q4

6. Shlyun N.V., Analysis of thermo-mechanical incompatibility of fullerenes with polymeric matrices of composites. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2024. 112. pp.139-148. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.112.139-148> **WoS Q4**

7. Gulyaev, V.I., Mozgovyi, V.V., Shlyun', N.V. Thermomechanical aspects of frost resistance of cement and asphalt concrete materials. *International Applied Mechanics*, 2023, 59(5), p. 594–604.. (Особистий внесок автора: виведення та розв'язування диференціальних рівнянь термопружного деформування композитних матеріалів під час замерзання води в їх порах і капілярах). DOI:[10.1007/s10778-024-01244-2](https://doi.org/10.1007/s10778-024-01244-2) **Scopus Q3**.

8. Gulyaev, V.I., Shlyun, N.V. Intrastructural thermal stresses in composites with homogeneous and heterogeneous spherical inclusions. *Strength of Materials*. 2023. 55(2). pp. 254–264. (Особистий внесок автора: розробка математичних моделей термопружного деформування асфальтобетонних матеріалів з гумовими включеннями в умовах температурних змін. виведення розв'язувальних рівнянь, побудова їх розв'язків). DOI:[10.1007/s11223-023-00520-9](https://doi.org/10.1007/s11223-023-00520-9) **Scopus Q4**

9. Gulyayev V.I., Mozgovyi V.V., Shlyun N.V., Shevchuk L.V. Modelling negative thermomechanical effects in reinforced road structures with thermoelastic incompatibility of coating and reinforcement materials. *System Research and Information Technologies*. 2022. 2022(2), pp.117-127. (Особистий внесок автора: побудова аналітичних виразів для визначення значень додаткових термонапружень та формулювання умов термомеханічної несумісності матеріалів асфальтобетону та арматури). DOI: [10.20535/SRIT.2308-8893.2022.2.09](https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2022.2.09) **Scopus Q4**

10. Gulyayev, V.I., Mozgovyi, V.V., Shlyun, N.V., Shevchuk, L.V., Bilobrytska, O.I. Negative thermomechanical effects in granular composites with incompatible thermomechanical parameters of their components. *International Review of Mechanical Engineering*. 2022. 16(4), pp. 188–197. (Особистий внесок автора: визначення концентрації напружень на поверхні сферичної пори). <https://doi.org/10.15866/ireme.v16i4.21996>. **Scopus Q2**

11. Gaidaichuk V.V., Shlyun N.V., Shevchuk L.V., Bilobrytska O.I. Theoretical modelling of the effect of thermal delamination of an asphalt concrete pavement from a rigid foundation of a road or bridge. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2022, 109, pp.38-49. (Особистий внесок автора: виконано аналіз термопружного деформування двошарової пластини зі співставними жорсткими характеристиками шарів). <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.38-49> **WoS Q4**

12. Shlyun, N.V., Gulyayev, V.I. Buckling of a drill-string in two-sectional boreholes. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020. 172. 105427. (Особистий внесок автора: виведення розв'язувальних рівнянь, побудова їх розв'язків). <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105427> **Scopus Q1**

13. Гайдайчук В.В., Густелев О.О., Шевчук Л.В., Шлюнь Н.В. Термопружне деформування шаруватого покриття на вгнутій ділянці дороги *Науково-технічний*

збірник «Опір матеріалів і теорія споруд». 2019. №. 102. С. 180-190. (Особистий внесок автора: проаналізовано вплив викривлення на перерозподіл полів напружень під дією температурних збурень). DOI: [10.32347/2410-2547.2019.102.180-190](https://doi.org/10.32347/2410-2547.2019.102.180-190) WoS Q4

Статті у фахових виданнях:

14. Шлюнь Н.В. Плоскі та просторові періодичні згинні коливання подовжених карбонових нанотрубок. *Вісник НТУ. Серія «Технічні науки»*. 2024. Вип. 1 (58). DOI: [10.33744/2308-6645-2024-1-58-203-211](https://doi.org/10.33744/2308-6645-2024-1-58-203-211) С. 203–211.

15. Шлюнь, Н.В., Заєць Ю.О. Термомеханічні деформування карбонових нанотрубок в полімерних матрицях. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Науково-технічний збірник. 2024. Вип. 115(1). С.67-80. (Особистий внесок автора: розробка математичної моделі зародження внутрішньоструктурних термонапружень в полімерних матеріалах, що армовані карбовими нанотрубками в умовах зміни в них однорідних і неоднорідних полів температур). DOI: [10.33744/0365-8171-2024-115.1-067-080](https://doi.org/10.33744/0365-8171-2024-115.1-067-080)

16. Гуляєв В. І., Шлюнь Н. В. Математичне моделювання внутрішньоструктурних термонапружень, що викликаються полями змінної температури в композитах зі стрижневою арматурою. *Дороги і мости*. Київ. 2023. Вип. 28. С. 58–69. (Особистий внесок автора: теоретичне моделювання ефектів зародження додаткових внутрішньоструктурних термонапружень в армуючих стрижнях (волокнах) з урахуванням їх покриття ізолюючим шаром). <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.068>

17. Шлюнь Н.В. Теоретичне моделювання зародження внутрішніх прихованих термічних дефектів у бітумному середовищі з гумовими включеннями. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2023. Вип. 114. с.106-121. DOI: [10.33744/0365-8171-2023-114.1-106-121](https://doi.org/10.33744/0365-8171-2023-114.1-106-121)

18. Гуляєв В.І., Шлюнь Н.В. Три механізми виникнення термонапружень і терморуїнувань у пружних тілах. *Вісник НТУ Серія «Технічні науки»*. 2023. Вип. 3 (57). С. 43-49. (Особистий внесок автора: виділені три основні причини порушення умов вільного термодформування пружних тіл, що призводять до генерування в них термонапружень). DOI: [10.33744/2308-6645-2023-3-57-043-049](https://doi.org/10.33744/2308-6645-2023-3-57-043-049)

19. Шлюнь Н.В., Білобрицька О.І., Шевчук Л.В., Заєць Ю.О. Концентрація термонапружень в цементобетоні в околі капіляра, частково або повністю заповненого водою, при її замерзанні. *НВЖ «Автошляховик України»*. №4. 2023. С.38-48. (Особистий внесок автора: визначення граничних рівнів наповнення водою пор та капілярів, за яких в цементобетонних та асфальтобетонних матеріалах виникають терморуїнування). DOI: [10.33868/0365-8392-2023-4-276-39-49](https://doi.org/10.33868/0365-8392-2023-4-276-39-49)

20. Гуляєв В.І., Мозговий В.В., Шлюнь Н.В. Заєць Ю.О. Внутрішньоструктурні термонапруження в асфальтобетонних і цементобетонних матеріалах, підсилені фібергласовою, фіберкарбовою, фібербазальтовою та фіберарамідною арматурою. *НВЖ «Автошляховик України»*. 2023. №3. С.62-69. (Особистий внесок автора: виведення виразів для радіальних та колових термонапружень, що викликаються зміною температури системи.). DOI: [10.33868/0365-8392-2023-3-275-62-69](https://doi.org/10.33868/0365-8392-2023-3-275-62-69)

21. Шлюнь, Н.В. Термомеханічна подібність при експериментальному та

теоретичному моделюванні термоміцності дорожніх матеріалів та конструкцій. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2023. Вип. 113. С.98-107. DOI: [10.33744/0365-8171-2023-113.1-098-107](https://doi.org/10.33744/0365-8171-2023-113.1-098-107)

22. Шлюнь Н.В., Білобрицька О.І., Шевчук Л.В., Заєць Ю.О. Умови відсутності та три механізми зародження термонапружень в пружних тілах. *Вісник НТУ Серія «Технічні науки»*. 2023. Вип. (55). С. 323-344. (Особистий внесок автора: виділені три основні причини порушення умов вільного термодетормування пружних тіл, що призводять до генерування в них термонапружень). DOI: [10.33744/2308-6645-2023-1-55-323-334](https://doi.org/10.33744/2308-6645-2023-1-55-323-334)

23. Гуляєв В.І., Мозговий В.В., Шлюнь Н.В. Чому в деяких регіонах у конструкціях мостів заборонена сталеві арматура з епоксидним покриттям? *НВЖ «Автошляховик України»*. №2. 2023. с.48-56. (Особистий внесок автора: виконаний аналіз термомеханічної несумісності матеріалів цементобетону та арматур) DOI: [10.33868/0365-8392-2023-2-274-48-56](https://doi.org/10.33868/0365-8392-2023-2-274-48-56)

24. Шлюнь Н.В. Пониження концентрації термонапружень у бітумному матеріалі з модифікованими гумовими крихтами. *НВЖ «Автошляховик України»*. №2. 2022. С.60-66. DOI: [10.33868/0365-8392-2022-2-270-60-66](https://doi.org/10.33868/0365-8392-2022-2-270-60-66)

25. Шлюнь Н.В., Заєць Ю.О. Про внутрішній механізм термопошкоджень в армованих композитах з термомеханічною несумісністю їх фаз. *Вісник НТУ Серія «Технічні науки»*. 2022. Вип. 3 (53). С.427-432. (Особистий внесок автора: виведення розв'язувальних рівнянь, знайдення їх розв'язків в замкненій формі). DOI: [10.33744/2308-6645-2022-3-53-427-432](https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-3-53-427-432)

26. Шлюнь Н. В. Особливості термонапруженого стану асфальтобетонного дорожнього покриття з гумовими включеннями. *Дороги і мости*. Київ. 2022. Вип. 26. С. 124–137. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.26.124>

27. Шлюнь Н.В., Білобрицька О.І. Сингулярно збурені задачі термомеханіки шаруватих дорожніх покриттів. *Вісник НТУ*. 2020. №.1(46). С. 455-461. (Особистий внесок автора: досліджено сингулярно-збурену задачу теплового деформування дорожнього покриття та розподіл в його масиві полів температури, переміщень та напружень). DOI: [10.33744/2308-6645-2020-1-46-455-461](https://doi.org/10.33744/2308-6645-2020-1-46-455-461)

28. Гуляєв В.І., Мозговий В.В., Густелєв О.О., Шлюнь Н.В., Куцман О.М., Баран С.А. Дослідження напружено-деформованого стану дорожнього одягу з укріпленою основою під поперечними тріщинами і швами. *Вісник НТУ*. 2019. №. 3(43). С. 26-38. (Особистий внесок автора: досліджено причини появи поперечних тріщин у верхньому шарі дорожнього покриття в зимовий час). DOI: [10.33744/2308-6645-2019-1-43-026-038](https://doi.org/10.33744/2308-6645-2019-1-43-026-038)

29. Гуляєв В.І., Шлюнь Н.В. Проектування оптимальних траєкторій свердловин. *Вісник НТУ*. 2021. Вип. 1 (49). С. 109-116. (Особистий внесок автора: комп'ютерне моделювання проблеми). DOI: [10.33744/2308-6645-2021-1-48-109-116](https://doi.org/10.33744/2308-6645-2021-1-48-109-116)

Опубліковані праці апробаційного характеру:

30. Шлюнь Н.В., Шевчук Л.В. Про деякі закономірності сезонного перерозподілу полів напружень у конструкціях шаруватих покриттів під дією транспортних навантажень. *Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні підходи у відновленні транспортної інфраструктури в особливих умовах воєнного стану: виклики та перспективи*. К.: НТУ, 2024. 660 с. ISBN 978-

966-632-328-9. (Особистий внесок автора: проведено скінченно-елементний аналіз перерозподілу полів напружень у конструкціях шаруватих покриттів під дією транспортних навантажень). DOI 10.33744/978-966-632-328-9-2024-3

31. Шлюнь Н. В., Заєць Ю. О. Термомеханічне зародження мікропорожнин в околі пор та капілярів дорожніх матеріалів заповнених водою. *International scientific-practical conference Current issues of science, education and technology in the context of modern challenges: conference proceedings*. Aarhus, Denmark, June 29, 2024. Aarhus, Denmark: Scholarly С.48-49. (Особистий внесок автора: визначення граничних рівнів наповнення водою пор та капілярів, за яких в цементобетонних та асфальтобетонних матеріалах виникають локальні тріщини і терморуйнування). <https://www.economics.in.ua/2024/06/29.html>

32. Шлюнь Н. В. Особливості термомеханічної подібності в армованих композитних середовищах. *International scientific-practical conference Science, education and technology: global trends and regional aspects: conference proceedings* Tampere, Finland, July 11, 2024. с.34-36. <https://www.economics.in.ua/2024/07/11.html>

33. Шлюнь Н.В., Заєць Ю.О., Берлянд М.С. Теоретичний аналіз внутрішньоструктурних термонапружень в композиті, що армований суцільними стрижнями. *LXXX наукова конференція професорського-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*. К.: НТУ, 2024. С. 759. ISSN: 2786-6459 (Online), ISSN: 2786-6467 (Print). (Особистий внесок автора: виконаний аналіз термомеханічної несумісності матеріалів асфальтобетону, цементобетону та арматур). DOI:10.33744/2786-6459-2024-80

34. Гуляєв В.І., Шлюнь Н.В. Мікротермомеханічні ефекти на інтерфейсних поверхнях композитів, які армовані карбоновими нанотрубками, в високоградієнтних полях температури. *LXXX наукова конференція професорського-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*. К.: НТУ, 2024. С. 853-854. ISSN: 2786-6459 (Online), ISSN: 2786-6467 (Print), (Особистий внесок автора: виконаний аналіз генерування у матриці недопустимих концентраторів термонапружень, що викликані термомеханічною несумісністю параметрів базового матеріалу та нанотрубки). DOI: 10.33744/2786-6459-2024-80

35. Шлюнь Н.В. Моделювання термонапруженого стану композиту при несумісних термомеханічних властивостях його матриці та наповнювача. *LXXIX наукова конференція професорського-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей*. К.: НТУ, 2023. С. 656. DOI: 10.33744/2786-6459-2023-79

36. Gaydaychuk V., Shlyun N., Shevchuk L., Kutsman O. Modelling discontinuous stress fields in multilayer coatings of automobile roads. *IEEE SAIC*. 2020. Kyiv, Ukraine. p. 140. (Особистий внесок автора: виконаний скінченно-елементний аналіз впливу тріщини на напружено-деформований стан багатошарової системи) **Scopus** DOI: 10.1109/SAIC51296.2020.9239207

37. Шевчук Л.В., Шлюнь Н.В., Тишкевич М.М. Термопружні деформації асфальтобетону на металевій плиті Південного моста. *LXXV наукова конференція професорського-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників*

відокремлених структурних підрозділів університету. К.: НТУ, 2019. С.505. (Особистий внесок автора: виконаний аналіз напруженодеформованого стану асфальтобетону)

https://drive.google.com/file/d/1QtiGot7hhzOMqfUWx3T99V_7q-QAzLx1/view

38. Шлюнь Н.В., Термонапружений стан дорожніх покриттів. III Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні методи і проблемно-орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій і їх застосування у проектуванні і навчальному процесі» вересень 2019. Р. 12-15.

https://drive.google.com/file/d/1QtiGot7hhzOMqfUWx3T99V_7q-QAzLx1/view

39. В. Гуляєв, Н. Шлюнь, Л. Шевчук, Ю. Заєць. Специфіка термомеханічного зародження внутрішніх дефектів в бітумній структурі з гумовими включеннями. *Впровадження інноваційних матеріалів і технологій при проектуванні, будівництві та експлуатації об'єктів транспортної інфраструктури в рамках програми «Велике будівництво»: збірник тез доповідей Міжнародної конференції*, м. Київ, 24-25 листопада 2022 року. Київ: НТУ, 2022, с.111. ISBN: 978-966-632-317-3 (Online). (Особистий внесок автора: дослідження особливостей температурного деформування та розподілення полів термонапружень в композитній структурі, що складається з бітумної матриці та гумових включень) DOI: [10.33744/978-966-632-317-3-2022-2](https://doi.org/10.33744/978-966-632-317-3-2022-2)

40. Шлюнь Н.В. Еволюція термонапружень в цементобетоні на стінці капіляру частково або повністю заповненого водою при падінні температури. *Перспективи розвитку автомобільного транспорту та інфраструктури: збірка тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції*. Київ: ДП ДержавтотрансНДІпроект», 2023, ст.96-90. ISBN 978-966-8799-22-8 https://insat.org.ua/files/nav/tkt/conferences/Thesis_Collect_2022.pdf

41. Шлюнь Н., Гринчак А. Математичне моделювання додаткових внутрішньоструктурних термонапружень в композитах із неоднорідними сферичними включеннями. *Всеукраїнська наукова конференція здобувачів освіти і молодих учених «Відбудова транспортної інфраструктури України»*. К.: НТУ, 2023. С. 99. ISBN: 978-966-632-319-7 (Особистий внесок автора: Побудова моделі, виведення розв'язувальних рівнянь, знайдення їх розв'язків). DOI: [10.33744/978-966-632-319-7-2023-1](https://doi.org/10.33744/978-966-632-319-7-2023-1)

Свідоцтва та патенти:

42. Пат. 155834 Україна, МПК (2024.01) E01C 7/00 E01C 11/00 Спосіб виключення ефекту термосилового відшарування асфальтобетонного покриття від крайових ділянок жорсткої основи дороги або мосту при температурних змінах. В.І. Гуляєв, Н.В. Шлюнь, О.І. Білобрицька, Л.В. Шевчук, С.А. Баран, І.І. Гринчак, заявник та власник Національний транспортний університет. № у 2022 02048 17.04.2024: опубл. 17.04.2024, Бюл. № 16. (Особистий внесок автора: дослідження виникнення зрушуючих термонапружень доріг при зміні їх температури). <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1795717/>

43. Пат. 152211 Україна, МПК E01B3/14 E01B31/28 Спосіб зменшення додаткових контактних термонапружень в асфальтобетонних дорожніх покриттях, армованих стрижнями, при несумісності термомеханічних параметрів матеріалів конструкції в умовах температурних впливів. В.І. Гуляєв, О.І. Білобрицька, Н.В.

Шлюнь, Л.В. Шевчук, О.М. Куцман, І.І. Гринчак, заявник та власник Національний транспортний університет. № u202202047 04.01.2023: опубл. 04.01.2023, Бюл. № 1/2023. *(Особистий внесок автора: побудова аналітичних виразів для визначення значень додаткових термонапружень, формулювання умов термомеханічної несумісності матеріалів)*. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1714351/>

44. Пат. 149263 Україна, МПК Е 01С 3/06 (2006.01) Спосіб виключення критичних напружень в зоні поперечного розвантажуючого розрізу багатошарового асфальтобетонного дорожнього покриття. Л.В. Шевчук, Н.В. Шлюнь, О.І. Білобрицька, С.А. Баран, О.М. Куцман, заявник та власник Національний транспортний університет. № u202103651 24.06.2021: опубл. 27.10.2021, Бюл. №43. *(Особистий внесок автора: аналіз скінченно-елементного моделювання)*. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1635254/>

45. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір Науковий твір: «Математичні формули для обчислення додаткових термонапружень в армованих дорожніх покриттях при термомеханічній несумісності матеріалів покриття і арматури». Н.В. Шлюнь, В.І. Гуляєв, Мозговий В.В., Л.В. Шевчук. №115933, 19.01.2023 *(Особистий внесок автора: виведення аналітичних виразів)*. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1730680/>

46. Свідоцтво про право автора на твір: комп'ютерна програма «Комп'ютерний аналіз впливу вертикальних тріщин та розшарувань в дорожньому покритті на поля деформацій та напружень в його конструкції» Шлюнь Н.В., Шевчук Л.В., Білобрицька О.І., Куцман О.М., № 96560, 2020 р. *(Особистий внесок автора: розроблено методіку комп'ютерного моделювання і прогнозування явищ концентрації напружень в багатошарових асфальтобетонних дорожніх покриттях)*. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1625410/>

47. Свідоцтво про право автора на твір: Комп'ютерна програма «Комп'ютерний аналіз впливу термомеханічних характеристик матеріалів дорожнього покриття на його термонапружений стан» Шлюнь Н.В., Шевчук Л.В., Білобрицька О.І., Баран С.А., № 96561, 2020 р. *(Особистий внесок автора: розроблено методіку комп'ютерного моделювання і прогнозування явищ концентрації напружень в багатошарових асфальтобетонних дорожніх покриттях)*. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1625408/>

АНОТАЦІЯ

Шлюнь Н.В. Моделі та методи розрахунку неоднорідних композитів з урахуванням макро і мікро термомеханічних ефектів у них. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.17 – будівельна механіка. – Національний транспортний університет, Київ, 2025.

Дисертаційну роботу присвячено проблемі встановлення закономірностей термонапруженого і термодетформованого станів шаруватих конструкцій дорожнього одягу доріг та мостів з урахуванням впливу несумісності термомеханічних параметрів матеріалів при зміні температури та на основі цього удосконалення таких конструкцій, а також удосконалення покривів, армованих

металевими і неметалевими стрижнями та неоднорідними включеннями, за рахунок раціонального підбору термомеханічних параметрів їх елементів, що мінімізує або виключає їх деформативну несумісність при температурних впливах.

Підвищення точності моделювання та теоретичної побудови полів термодеоформації і термонапружень в шаруватих конструкціях дорожнього одягу доріг і мостів, посилених арматурою, є одним із основних факторів, що сприяють покращенню їх якості та збільшення довговічності в умовах сезонних та добових змін температури в Україні. Для їх досліджень у роботі розроблені нові термомеханічні та математичні моделі термомеханічного деформування неоднорідних конструкцій з армуючими включеннями у вигляді систем диференціальних рівнянь. З використанням комп'ютерних та аналітичних методів побудовані їх розв'язки. Показано, що внутрішній механізм зародження концентраторів внутрішньоструктурних термонапружень в зонах інтерфейсних поверхонь між контактуючими фазами матеріалу і арматури, що спровоковані несумісністю термомеханічних фракцій системи, може бути основною причиною ініціювання термопошкоджень (зокрема і на мікрорівнях, а тому і малопомітних на початкових етапах), які сприяють деградації матеріалу та його подальшої деструкції.

Методами теорії термонапружності досліджено ефекти термодеоформування в неоднорідних структурах, які містять металеві, полімерні, асфальтобетонні і цементобетонні матеріали. Виконано математичне моделювання явищ концентрації термонапружень в матриці композиту на інтерфейсних поверхнях її контакту зі сферичними, стрижневими, однорідними, неоднорідними і порожнистими арматурами та мікрОВОлокнами, а також нановключеннями в однорідних і неоднорідних полях температури. Досліджений механізм деградації матеріалів внаслідок замерзання та відтавання води в їх порах і капілярах. Показано, що цей процес реалізується лише при заповненні порожнини водою більш, ніж на 91% її об'єму.

Ключові слова: внутрішньоструктурні термонапруження, термомеханічна несумісність, композитні матеріали, інтерфейсні поверхні, концентратори напружень, нановключення.

ABSTRACT

Shlyun N.V. Models and methods of calculating heterogeneous composites taking into account macro and micro thermomechanical effects in them. – Manuscript.

The thesis for the Doctor of Technical Science degree on specialty 05.23.17 «Mechanics of Structures». – National Transport University Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2025.

This dissertation is devoted to the development of models and computational methods for heterogeneous composites, accounting for macro- and micro-thermomechanical effects. Specifically, it investigates the patterns of thermally induced stress and strain states in layered road pavement and bridge deck structures, considering the incompatibility of thermomechanical material properties under temperature variations. Based on this analysis, the study proposes improvements for such structures as well as for coatings reinforced with metallic/non-metallic rods and heterogeneous inclusions by

optimizing the thermomechanical parameters of their components, thereby minimizing or eliminating deformation incompatibility under thermal loads.

Enhancing the accuracy of modelling and theoretical prediction of thermal deformation and stress fields in reinforced layered pavement and bridge structures is a key factor in improving their quality and durability under Ukraine's seasonal and diurnal temperature fluctuations. To achieve this, the work develops novel thermomechanical and mathematical models of thermomechanical deformation in heterogeneous structures with reinforcing inclusions, formulated as systems of differential equations. Their solutions are derived using computational and analytical methods. The study demonstrates that the internal mechanism of thermal stress concentration at interfacial zones between material phases and reinforcements – triggered by thermomechanical incompatibility – can initiate thermally induced damage (including at microlevels, often imperceptible in early stages), accelerating material degradation and eventual structural failure.

Using thermoelasticity theory, the research examines thermomechanical deformation effects in heterogeneous structures containing metallic, polymeric, asphalt-concrete, and cement-concrete materials. Mathematical modelling is performed to analyze thermal stress concentration in composite matrices at interfacial contact surfaces with spherical, rod-like, homogeneous, heterogeneous, and hollow reinforcements under uniform and non-uniform temperature fields. Damage mechanisms due to water freezing in material pores and capillaries are investigated. Additionally, a theoretical study is conducted on internal thermal stress generation in polymer materials reinforced with carbon nanotubes and fullerenes, arising from thermomechanical incompatibility.

A new computational system is developed to analyze thermal stress fields in heterogeneous structures, accounting for function discontinuities and their interfacial concentration under high-temperature gradients.

The dissertation presents multiparametric strength calculations and structural analyses of road systems under varying geometric and physico-mathematical parameters, enabling stress/strain concentration mitigation and enhanced system longevity. These findings contribute to solving critical challenges in the restoration and development of Ukraine's road infrastructure network.

Keywords: intrastructural thermal stresses, thermomechanical incompatibility, composite materials, interface surfaces, stress concentrators, nanoinclusions.