

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва та транспорту
Кафедра будівельних, дорожніх машин і будівництва

Магістерська робота

на тему: **АНАЛІЗ КЛЕЙОВИХ АНКЕРНИХ СИСТЕМ
ПІД ДІЄЮ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ТЕМПЕРАТУР**

Допустити до захисту

Завідувач кафедри БДМБ, к.т.н., професор

В.А. Настоящий

" ____ " _____ 2022 р.

Керівник магістерської роботи, к.т.н., ст. викладач

М.В. Пашинський

" ____ " _____ 2022 р.

Консультант з охорони праці, к.т.н., доцент

В.В. Дарієнко

" ____ " _____ 2022 р.

Виконав студент 6 курсу

спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія

В.М. Носик

" ____ " _____ 2022 р.

Кропивницький – 2022 рік

Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кількість	Примітки	
				Документація загальна			
				Знову розроблена			
				Анотація	1		
				Summary	1		
A4			МР ПЗ	Пояснювальна записка			
				Зміст	3		
				Вступ	2		
				Розділ 1 Види та використання анкерних систем	9		
				Розділ 2 Методи і засоби для випробувань бетону та клейових анкерів	22		
				Розділ 3 Результати випробувань бетонних зразків із вклеєними анкерами	10		
				Розділ 4 Методика чисельного моделювання роботи анкерів	16		
				Розділ 5 Результати чисельного моделювання методом скінченних елементів	24		
				Висновки за результатами досліджень	2		
				Conclusions results of research	2		
				Список використаних джерел	2		
				Додаток А Заходи захисту працівників у зимовий час на будівельному майданчику	9		
				Ілюстраційні матеріали			
				Знову розроблені			
A4			КМР 1619210 ПР	Мультимедійна презентація з наочними поясненнями методики і результатів виконаних досліджень	22		
				КМР 2119211 ПЗ			
Зм	Лист	№ документа	Підпис				Дата
Розробив	Носик В.М.				Аналіз клейових анкерних систем під дією екстремальних температур		
Перевірив.	Пашинський М.В.						
					ЦНТУ гр. БІ-21 М		
Н. контр.	Дарієнко В.В.						
Затвердив	Настоящий В.А.						
					Стадія	Аркуш	Аркушів
					Д	1	1

АНОТАЦІЯ

В магістерській роботі розроблена методика моделювання клейової анкерної системи методом скінченних елементів у середовищі програмного комплексу ANSYS 18.2 з метою визначення несучої здатності при висмикуванні анкера. Верифікація розробленої методики здійснена шляхом порівняння результатів моделювання з опублікованими результатами експериментальних випробувань аналогічних вузлів, які були проведені Національною академією наук, техніки та медицини США.

Шляхом раніше виконаних експериментальних досліджень та моделювання в середовищі програмного комплексу ANSYS 18.2 встановлено, що клей на основі епоксидної смоли з амінним отверджувачем однаково добре працює при різних температурах, а клей з бісфенольної епоксидної смоли з амінним отверджувачем має нижчу міцність при нормальних і високих температурах, але краще працює при низьких температурах. Клей на основі уретанметакрилатної смоли з отверджувачем дибензоїлпероксид помітно зменшує жорсткість при збільшенні температури експлуатації. Вузли з анкерами з арматурного стержня в середньому мають більшу несучу здатність, ніж вузли з різьбовими стержнями. Збільшення діаметра отвору під анкер призводить до зменшення несучої здатності вузла з різьбовим анкером та до зростання несучої здатності вузла з анкером із арматури періодичного профілю.

Розроблена методика моделювання роботи клейової анкерної системи за методом скінченних елементів у середовищі програмного комплексу ANSYS 18.2 включає рекомендації щодо вибору форми, характеристик, розмірів та кількості скінченних елементів, характеристик міцності та пружності бетону, сталі та клейових компонентів. Розрахунки за запропонованою методикою забезпечують задовільну збіжність несучої здатності вузлів з опублікованими результатами експериментальних випробувань, які були проведені Національною академією наук, техніки та медицини США. Це дозволяє виконувати розрахунки вузлів на вклеєних анкерах методом скінчено-елементного моделювання.

A N N O T A T I O N

In the master's thesis, a method of modeling the adhesive anchor system using the finite element method was developed in the ANSYS 18.2 software environment in order to determine the load-bearing capacity when the anchor is pulled out. Verification of the developed methodology was carried out by comparing the simulation results with the published results of experimental tests of similar nodes, which were conducted by the US National Academy of Sciences, Technology and Medicine.

Through previously performed experimental studies and simulations in the ANSYS 18.2 environment, it was found that the amine-cured epoxy adhesive performs equally well at different temperatures, while the bisphenol-amine-cured epoxy adhesive has lower strength at normal and high temperatures, but works better at low temperatures. Adhesive based on urethane methacrylate resin with dibenzoyl peroxide hardener significantly reduces stiffness when the operating temperature increases. Nodes with rebar anchors have a higher load-bearing capacity on average than nodes with threaded rods. An increase in the diameter of the hole for the anchor leads to a decrease in the load-bearing capacity of the node with a threaded anchor and to an increase in the load-bearing capacity of the node with an anchor made of periodic profile reinforcement.

The developed methodology for modeling the work of the adhesive anchor system using the finite element method in the ANSYS 18.2 software environment includes recommendations for choosing the shape, characteristics, sizes and number of finite elements, strength and elasticity characteristics of concrete, steel and adhesive components. Calculations according to the proposed method ensure a satisfactory convergence of the bearing capacity of nodes with the published results of experimental tests, which were conducted by the National Academy of Sciences, Technology and Medicine of the USA. This allows you to perform calculations of nodes on glued anchors using the method of finite element modeling.

З М І С Т

ВСТУП.....	4
Розділ 1 ВИКОРИСТАННЯ АНКЕРНИХ СИСТЕМ І ЇХ ВИДИ.....	6
1.1 Огляд типів анкерних систем.....	6
1.2 Моделі поведінки та схеми відмови клейових анкерів	7
1.3 Властивості епоксидної смоли та вплив температури на поведінку епоксидного клею.....	9
1.4 Вплив температури на поведінку бетону.....	11
1.5 Вплив температури на поведінку сталі.....	12
1.6 Висновки за результатами аналізу літератури та завдання дослідження ..	13
Розділ 2 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ БЕТОНУ ТА КЛЕЙОВИХ АНКЕРІВ.....	15
2.1 Нормативні документи щодо випробувань клейових анкерів	15
2.2 Фізичні випробування анкера	16
2.3 Підготовка зразків для випробувань	18
2.4 Випробування бетону на міцність в лабораторних умовах	21
2.5 Метод ударного імпульсу.....	23
2.6 Метод пластичної деформації.....	25
2.7 Фізичні методи неруйнівного контролю	26
2.8 Метод ультразвукового вимірювання.....	27
2.9 Морозильна і теплова камери	29
2.10 Конструкція та компоненти випробувальної установки.....	30
2.11 Висновки з розділу	35

					MP 2119211 ПЗ						
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розробив		Носик В.М.			Аналіз клейових анкерних систем під дією екстремальних температур			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевірів		Пашинський М.В.								1	101
Реценз.								ЦНТУ гр. Бі-21М			
Н. Контр.		Дарієнко В.В.									
Затвердив		Настоящий В.А									

Розділ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ БЕТОНИХ ЗРАЗКІВ ІЗ ВКЛЕЄНИМИ АНКЕРАМИ.....	37
3.1 Результати фізичних випробувань	37
3.2 Матеріал №1	38
3.3 Матеріал №2	41
3.4 Матеріал №3	43
3.5 Випробування арматурного стержня на висмикування	44
3.6 Винятки щодо специфікацій виробника	45
3.7 Узагальнення результатів випробувань та висновки з розділу	46
Розділ 4 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ АНКЕРІВ	47
4.1 Скінчено-елементне моделювання	47
4.2 Модель скінченних елементів.....	48
4.3 Властивості матеріалу.....	56
4.4 Контактні умови	60
4.5 Прикладена сила.....	61
4.6 Процедура аналізу	61
4.7 Висновки з розділу	62
Розділ 5 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ	63
5.1 Результати моделювання методом скінченних елементів	63
5.2 Різьбовий стержень без клейового покриття дна отвору	64
5.3 Різьбовий стержень з клейовим покриттям дна отвору	72
5.4 Арматурний стержень без клейового покриття дна отвору	74
5.5 Арматурний стержень з клейовим покриттям дна отвору.....	79

5.6 Порівняння результатів фізичного випробування та методу скінченних елементів	81
5.7 Висновки з розділу	84

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		3

ВСТУП

Актуальність теми роботи. Клейові анкерні системи знайшли широке застосування в будівельних конструкціях. Вони використовуються при розширенні мостів, ремонті і відновленні бетону, а також під час модернізації огорожень. Оскільки клейові системи кріплення зазвичай встановлюються на відкритому повітрі, при їх проєктуванні слід враховувати вплив кліматичних умов і щоденних температурних коливань на поведінку та ефективність клею. Чинні норми проєктування приділяють недостатньо уваги клейовим анкерним системам, тому необхідно розробити методику їх проєктування на основі чисельного моделювання методом скінченних елементів. Для верифікації розробленої методики результати чисельного моделювання доцільно порівняти з результатами лабораторних випробувань вклеєних анкерів, проведених Національною академією наук, техніки та медицини США[1].

Мета дослідження: розробити і верифікувати методику моделювання роботи клейової анкерної системи за методом скінченних елементів у середовищі програмного комплексу ANSYS 18.2.

Об'єкт дослідження – робота з'єднань на сталевих анкерах, вклеєних у бетонний масив.

Предмет дослідження – несуча здатність і деформативність анкерних з'єднань на різьбових та арматурних анкерах з різним складом клею при різних температурах виготовлення та експлуатації.

Методи дослідження: моделювання роботи клейової анкерної системи за методом скінченних елементів у середовищі програмного комплексу ANSYS 18.2, порівняння результатів з результатами раніше виконаних експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів:

- 1) обґрунтовані форма, розміри та кількість скінченних елементів, необхідних для достатньо точного моделювання в середовищі програмного комплексу ANSYS 18.2 вузлів клейового кріплення сталевих анкерів до бетонного масиву;

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						4
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

- 2) експериментальним шляхом виявлено вплив температури при виготовленні та експлуатації на несучу здатність та деформативність анкерних з'єднань на клеях трьох видів;
- 3) підтверджена задовільна збіжність результатів чисельного моделювання методом скінченних елементів у середовищі програмного комплексу ANSYS 18.2 з результатами випробувань клейових анкерних з'єднань.

Практичне значення одержаних результатів:

- 1) експериментальним шляхом отримані значення несучої здатності та деформативності анкерних з'єднань на клеях трьох видів при різних температурах виготовлення та експлуатації з'єднань;
- 2) надані рекомендації щодо методики моделювання вузлів клейового кріплення сталевих анкерів до бетонного масиву в середовищі програмного комплексу ANSYS 18.2.

Апробація та публікація результатів досліджень:

Результати магістерської роботи представлені на Міжнародній науково-технічній конференції “Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві” (м. Кропивницький, листопад, 2022 року) та опубліковані в тезах доповіді:

Носик В., Остапенко О., Демідкін Д. Неруйнівний контроль міцності ніздрюватого бетону методом відриву анкера // Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві (АКІТ-2022): Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Кропивницький: ПП «Ексклюзив-Систем», 2022. – С. 227-228. – [Електронний ресурс].

Структура роботи. Робота містить 97 сторінок, у тому числі 8 таблиць, 58 рисунків, список з 22 використаних джерел, анотацію українською та англійською мовами, а також мультимедійну презентацію з 22 слайдів. Текст роботи складається зі вступу, 6 розділів, висновків за результатами досліджень та 1 додатку на 7 сторінок.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						5
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Розділ 1

ВИДИ ТА ВИКОРИСТАННЯ АНКЕРНИХ СИСТЕМ

1.1 Огляд типів анкерних систем

Клейові анкерні системи широко застосовуються в будівельних конструкціях в останні роки. Анкерна система зазвичай характеризується вбудованим у затверділий бетон сталевим анкером або арматурним стержнем, який потім можна використовувати для з'єднання подальших елементів конструкції. Вони зазвичай використовуються для розширення мостів, ремонту бетону, реконструкції, модернізації огорожень та встановлення несучих або огорожувальних елементів у бетон.

Існують два типи анкерних систем: анкери, що заливаються (заливний анкер), і анкери, встановлені після монтажу. У подальшому можна поділити анкери на дві групи: клейові та механічні анкери. Клейовим анкерам буде приділена основна увага цієї роботи.

Заливний анкер встановлюється у вологий бетон до його затвердіння. Заливні анкери мають переваги в тому, що вони є передбачуваними та їх поведінку можна легко спрогнозувати; однак їх складно встановити з високою точністю, а також неможливо перемістити після затвердіння бетону.

У той же час анкери, що встановлені після монтажу, дозволяють легше і точніше вирівнювати їх під час процесу установки, але вони можуть мати більшу варіативність несучої здатності та потребують особливих методів монтажу анкерної системи.

Оскільки використання мостів вимагає встановлення клейових анкерних систем на відкритому повітрі, кліматичні умови та зміна температури щодня враховуються при аналізі міцності та поведінки цих систем. Але треба враховувати, що клеї для цих анкерів мають різні механічні властивості і не завжди є можливість контролювати умови навколишнього середовища, в якому вони встановлені.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						6
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Температура зовнішнього повітря у більшості випадків непередбачувана і може підвищуватися або знижуватися протягом ночі, що впливає на клей, процес твердіння та міцність з'єднання. Як правило, при підвищенні температури строк твердіння для епоксидних клеїв зменшується; коли температура знижується, строк твердіння збільшується.

Невраховані різкі перепади температури можуть призвести до неповного затвердіння і послабити з'єднання.

1.2 Моделі поведінки та схеми відмови клейових анкерів

Клейові анкерні системи можуть вийти з ладу в будь-якому з трьох варіантів: руйнування бетону, сталевго анкера або клейового матеріалу. Існує п'ять основних причин відмови:

- 1) розрив бетону;
- 2) руйнування контакту «клей/бетон»;
- 3) руйнування контакту «сталь/клей»;
- 4) неправильна технологія виконання робіт, що призводить до зменшення адгезії контактів «клей/бетон» і «сталь/клей»;
- 5) руйнування сталі.

Приклад руйнування клейових анкерів зображений на рисунку 1.1.



Рис. 1.1 Руйнування клейового анкера під час обвалення стелі тунелю

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						7
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Руйнування сталі можна вважати руйнуванням самого анкерного стержня і, як правило, це є режимом проєктної відмови для скріплених анкерів у анкерній системі, в якій надмірні напруження повністю руйнують анкер.

Характер руйнування клею залежить від температури, при якій воно відбувається. При низьких навантаженнях клей, що знаходиться ближче до поверхні, навантажений більше, ніж клей, що розташований глибше до отвору. Зі збільшенням навантаження клей, що ближче до поверхні, стає пластичним, що перерозподіляє навантаження в отворі. Навантаження продовжують збільшуватися, більш глибокі частини клею стають пластичними. Розподіл навантажень зрештою стає відносно рівномірним приблизно на 70% від максимального рівня навантаження, будь-яке подальше збільшення навантаження призводить до роботи клею в пластичній стадії, що призводить до відмови. П'ять основних схем відмови клеєвого анкерного з'єднання зображені на рисунку 1.2.

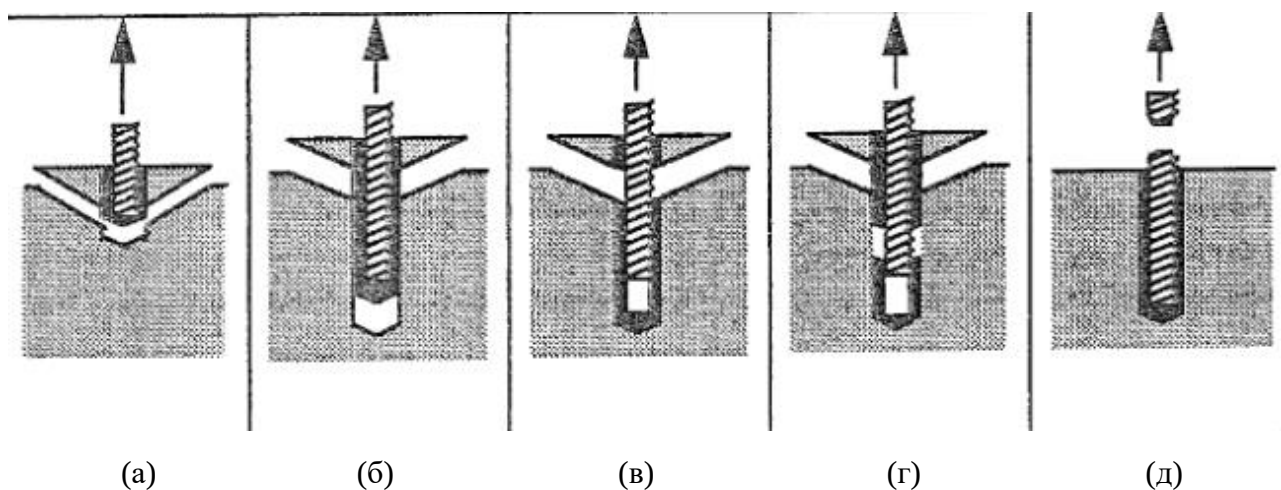


Рис. 1.2 Руйнування клеєвого анкера під час обвалення стелі тунелю
 А - розрив бетону; Б - руйнування контакту «клей/бетон»; В - руйнування контакту «сталь/клей»; Г - неправильна технологія виконання робіт, що призводить до зменшення адгезії контактів «клей/бетон» і «сталь/клей»;
 Д - руйнування сталі.

1.3 Властивості епоксидної смоли та вплив температури на поведінку епоксидного клею

Нормативні документи встановлюють вимоги до клейових анкерів в бетонних елементах та до клейових анкерів із регульованим крутним моментом і систем арматурних стрижнів, що встановлюються в бетоні.

Тип анкеру, встановленого після заливання бетону, визначає методику натурних досліджень та вимоги до оцінки несучої здатності для використання клейових анкерів у бетоні згідно з положеннями, де наведено критерії оцінки клейової системи, її міцності, надійності, умов експлуатації та контролю якості в різних умовах, включаючи сейсмічні навантаження, постійні навантаження, зниження та підвищення температур та визначення допустимості анкерів для використання в бетоні з тріщинами та без тріщин. Клейові анкерні системи зазвичай склеюються епоксидними клеями та іншими речовинами.

Епоксидний клей - це термореактивний полімер, який утворює тривимірну хімічну речовину або поперечні зв'язки з затверджувачем і вимагає тепла для затвердіння.

Це тепло утворюється в результаті екзотермічної реакції між епоксидною смолою та хімічним елементом, що додається для затвердіння. Епоксидні клеї для високоефективних анкерних систем зазвичай використовуються в системах вприскування з подвійним картриджем із попередньо відміряними порціями смоли та затверджувача, які змішуються у запатентованій змішувальній насадці під час дозування.

Під час нагрівання термореактивні полімери зазвичай розкладаються, а не плавляться, отже клей незворотно схоплюється після затвердіння, на відміну від термопластичних полімерів, які оборотно розм'якшуються при нагріванні за межі точки склеювання і тверднуть, коли охолоджені. Термореактивні полімери утворюють стійкі хімічні зв'язки, що виключає можливість розм'якшення при додатковому нагріванні і значно підвищує стійкість до механічних деформацій.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						9
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Крім того, клеї з вищою температурою склеювання (T_g) або температурний діапазон, при якому відбувається склування зазвичай мають вищу міцність на розрив. Температура експлуатації полімерів, що виготовлені при високих температурах, повинна залишатися нижче значення T_g , щоб полімер залишався у високоміцному склоподібному стані.

Склування – це поступовий процес, під час якого полімер переходить з пластичного, в'язкого стану у твердий, склоподібний стан, або навпаки – цей процес відомий як гелеутворення. Можна виділити три основні типи твердіння: якщо полімер затвердів вище граничного значення T_g відбуватиметься лише гелеутворення, а при охолодженні він стане склоподібним; якщо полімер затвердіє нижче T_g , але вище температури, при якій відбувається гелеутворення та склування одночасно, полімер спочатку буде в гелеподібному стані, а потім затвердне; і якщо полімер затвердів нижче цього значення, полімер лише затвердне.

Для будівельних матеріалів і температури навколишнього середовища, всі матеріали твердіють нижче T_g . Коли полімер твердне, його T_g збільшується і може перевищувати температуру твердіння. Полімер повністю затвердіє, коли він досягає критичного ступеня схоплення в оптимальний час зтвердіння, під час якого його модуль пружності при згині значно збільшується і стає сталим.

Міцність епоксидного клею підвищується, коли полімер затвердіє, це залежить від температури та швидкості процесу твердіння.

Міцність з'єднання в системі кріплення може залежати від ряду інших параметрів. Крім типу використаного клею це може бути, наприклад, як часто просвердлені отвори, вологість отворів, глибина закладення, діаметр анкера та тривалість затвердіння клею. Було помічено, що зниження температури під час схоплення підвищує в'язкість клею, а також уповільнює час його затвердіння. Під дією підвищених температур близько 40°C здатність епоксидної смоли чинити опір навантаженню на розрив суттєво зменшується.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

При температурах вище інтервалу склування полімери знаходяться в гумоподібному стані. Полімери стають жорсткими та крихкими через обмежений молекулярний рух. Знижується ударостійкість, а крихкість стає основною причиною аварії. Однак при зниженні температури знижуються пластичність полімеру, граничне напруження значно зростає.

Крім того, коли температура збільшується, межа текучості при розтягуванні зменшується, а пластичність полімеру зростає.

1.4 Вплив температури на поведінку бетону

Бетон може бути серйозно пошкоджений в умовах високої температури, зазвичай внаслідок пожежі.

Такі фактори, як розмір зразка, напружений або ненапружений стан, залишкові деформації впливають на його механічні властивості, але лише при підвищенні температури понад 100 °С. У таких випадках, як показано на графіку (Рис. 1.3), крива «напруження-деформація бетону» показує, що пікове напруження та модуль пружності бетону зменшуються з підвищенням температури, тоді як деформація зростає. Однак, в проведених тестах використовувалися температури тільки до 800 °С. В діапазоні від температури навколишнього середовища до 300 °С поведінка бетону залишається в основному незмінною.

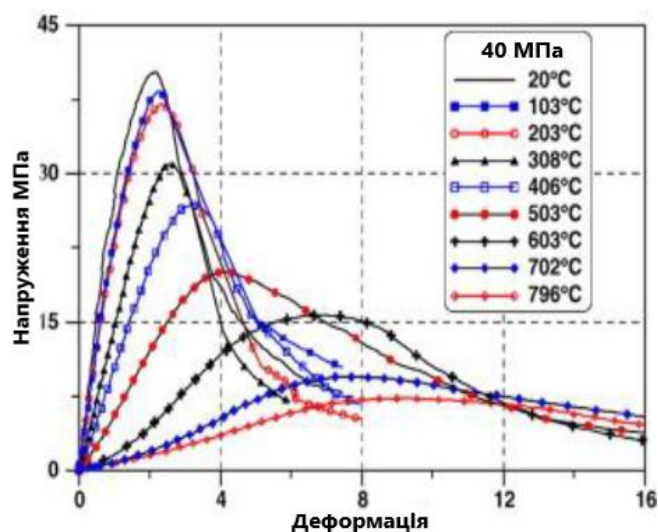


Рис. 1.3 Графік кривої напруження-деформація бетону при зміні температури

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						11
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Дослідження, також підтверджує результат: коли температура знижувалась від 50 °С до -20 °С, міцність на стиск і модуль пружності бетонних зразків збільшилися.

1.5 Вплив температури на поведінку сталі

Сприйнятливність сталі до підвищених температур була широко вивчена для ліквідації наслідків пожеж, тож в діапазоні температур від 22°С до 300°С гранична міцність зразків сталі залишалася в основному незмінною з невеликими варіаціями, і суттєво почала падати близько 410 °С. Крім того, модуль пружності зменшується, коли температура зростає (Рис. 1.4).

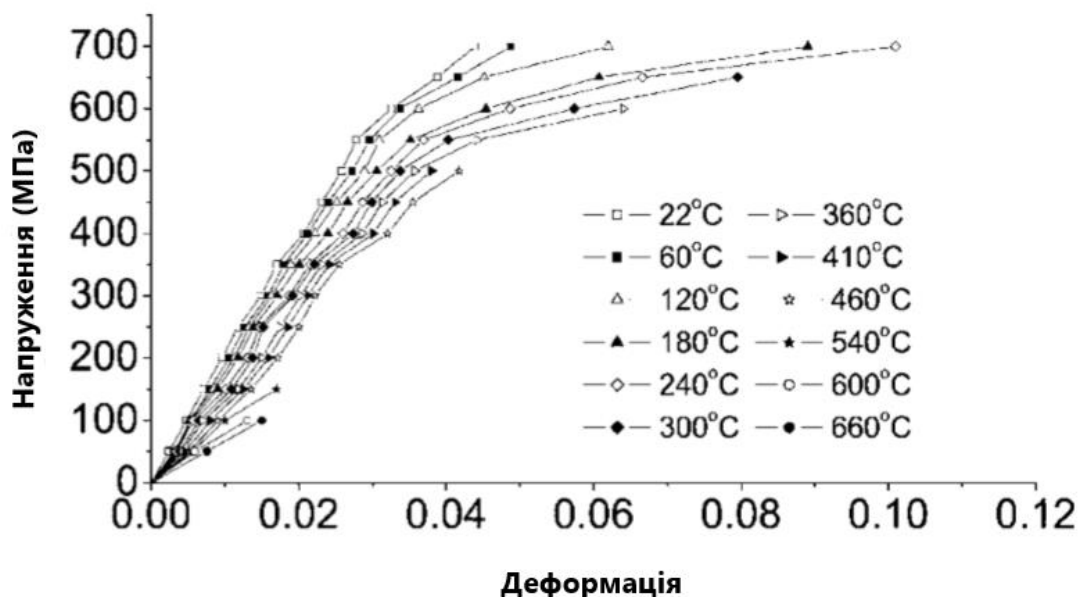


Рис. 1.4 Вплив температури на поведінку сталі

Дослідження показали, що при зниженні температури до -165 °С текучість і межа міцності випробуваної сталі зросла, тоді як пластичність була знижена. Руйнування арматурної сталі змінюється з пластичної стадії на крихку при температурі -80°С.

При 0 °С спостерігається лише невелике підвищення кінцевої міцності та незначна зміна модуля пружності; тому властивості сталевого матеріалу зберігаються і не змінюються.

1.6 Висновки за результатами аналізу літератури та завдання дослідження

1. Анкери в бетон можуть встановлюватися як під час бетонування, так і в просвердлені отвори на клею. Останній варіант дозволяє точніше встановити анкери, але вимагає використання ефективних клеїв.

2. Залежно від конструкції та технічних характеристик матеріалів, руйнування клейового анкера може відбуватися за різними схемами.

3. Схема руйнування та несуча здатність клейового анкера значною мірою залежить від температурного режиму експлуатації, який істотно впливає на властивості використаного клею.

4. При звичайних робочих температурах у межах 200 °С механічні характеристики бетону змінюються неістотно, а при вищих температурах зростає деформативність та знижується міцність бетону.

5. Модуль пружності сталі починає помітно зменшуватися при температурах 200 °С та вищих, що призводить до зростання деформативності сталевих конструкцій.

Завдання досліджень, які необхідно розв'язати для досягнення поставленої мети:

1. Підібрати, вивчити й узагальнити інформацію з літературних джерел про типи, конструкцію та роботу клейових анкерних систем при висмикуванні анкера, можливості їх моделювання методом скінченних елементів, вплив температурних умов виготовлення та експлуатації на роботу анкерного з'єднання на основі різних видів анкерів та клейових компонент.
2. Вивчити, проаналізувати й узагальнити методику і результати наявних в технічній літературі випробувань сталевих анкерів, вклеєних в бетонні моноліти, та оцінити придатність цих результатів для верифікації запропонованої методики чисельного моделювання.
3. Розробити методику моделювання роботи клейової анкерної системи за методом скінченних елементів у середовищі програмного комплексу

ANSYS 18.2, зокрема обґрунтувати вибір форми, характеристик, розмірів та кількості скінченних елементів, характеристик міцності та пружності бетону, сталі та клейових компонентів, які дозволять отримати достатньо точні результати моделювання

4. У середовищі програмного комплексу ANSYS 18.2 виконати моделювання клейових анкерних вузлів різної конструкції з різьбовими анкерами та з анкерами з арматури періодичного профілю, а також з різними клейовими компонентами та їх роботу на висмикування анкера в різних температурних умовах і встановити несучу здатність та деформативність змодельованих вузлів.
5. Порівняти результати моделювання з результатами випробувань, проведених Національною академією наук, техніки та медицини США, з метою верифікації методики моделювання, включаючи достовірність і точність моделі.
6. Дослідити вплив температурного режиму виготовлення та експлуатації на несучу здатність і деформативність анкерного з'єднання, а також виявити відмінності між різьбовими й арматурними анкерами та оцінити ефективність їх роботи.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						14
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Розділ 2

МЕТОДИ І ЗАСОБИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ БЕТОНУ ТА КЛЕЙОВИХ АНКЕРІВ

2.1 Нормативні документи щодо випробувань клейових анкерів

У світі і в Україні існує багато нормативних документів та стандартів щодо випробувань клейових анкерів. Так, наприклад, процедура і послідовність випробувань в Америці проводиться згідно Американського товариства випробувань матеріалів (ASTM) [2] та Американського інституту бетону (ACI) [3].

Бетонні та цегляні елементи є загальноприйнятим об'єктом тестування. Так, в Україні діють ДБН В.2.6-162:2010 "Кам'яні та армокам'яні конструкції" [4] та ДБН В.2.6-98:2009 "Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення" [5]. Але в цих стандартах описані лише основні принципи проєктування конструкцій, тому необхідно уточнити методику для визначення короточасної міцності анкерів для всіх типів бетонних анкерних систем: відлитого на місці, механічно встановленого після бетонування та клейового.

В [2] та [3] розглядаються процедури випробувань для визначення статичної, сейсмічної, втомленої та ударної міцності, міцності на розтяг і зсув бетонних і цегляних анкерів, а також тестування на вплив температури навколишнього середовища, заморожування та відтавання, вологи, занижених і підвищених температур, корозії.

Метод випробування полягає в тому, що анкер піддається початковому навантаженню в 5% від розрахункової максимальної несучої здатності перед застосуванням безперервного розтягуючого навантаження таким чином, що пік навантаження виникає через 2 ± 1 хвилини після початку навантаження. Навантаження і деформації контролюються та записуються протягом усього тесту з мінімальною частотою вибірки. Дослід вимагає випробування мінімум п'яти анкерів для визначення середнього статичного навантаження при стандартній температурі, $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						15
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

2.2 Фізичні випробування анкера

Для імітації різних температурних умов у діапазоні від $-6,67^{\circ}\text{C}$ до 49°C використовували холодильну та теплову камеру, в яких зразки зберігались, тверділи і тестувались. Усі анкери були встановлені відповідно до специфікацій виробника, а наступні випробування на висмикування проводилися з невеликими відхиленнями відповідно до ASTM E488 [6].

Усі тестові зразки були розроблені та виготовлені відповідно до вимог AASHTO TP-84 [7]. Зразки, зображені на рисунках 2.1 і 2.2, склалися з трьох компонентів: бетонної основи в формі циліндру, сталевого анкерного або арматурного стрижня та клейового матеріалу.

У цьому дослідженні використовується стандартний бетон M200 (B15). Зразки були відлиті діаметром 400 мм з висотою 200 мм.



Рис. 2.1 Бетонні зразки з позначеним центром

Зразки накривали вологою мішковиною та пластиковою плівкою та витримували протягом 14 днів перед тим як їх витягли з опалубки, потім залишили в лабораторних умовах протягом як мінімум 28 днів.

					MP 2119211 ПЗ	Аркуш
						16
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Окрім зразків, у тих же умовах відливали пробні циліндри, які використовувались для випробування міцності на стиск за допомогою пресу МС-1000 відповідно до ДСТУ Б В.2.7-43-96 [8]. У таблиці 1 наведено чотири значення міцності бетону на стиск через 28 днів і в кінці випробування.

Таблиця 2.1

Міцність бетону на стиск

14 днів (кг/см ³)	28 днів (кг/см ³)
248	275
253	281
239	278
245	266

Використовувалися два типи анкерних стержнів: стержень з різьбленням згідно [2] і термооброблений арматурний стержень Grade 60. Для мінімізації можливості руйнування сталі було обрано різьбовий стержень, який має номінальну межу міцності 896 кПа та граничну міцність 1034 кПа. Кожен анкер з різьбовим стержнем мав діаметр 12,70 мм і нарізку на 150 мм довжини. Анкери з різьбовими стержнями були встановлені в бетон на глибині в 70 мм, закладення проводилось відповідно до мінімальної глибини закладення, яка передбачена в ДСТУ EN 795:2017 [9]. Ця глибина була обрана з метою забезпечення розриву зв'язку між бетоном і анкером.

Анкери з арматурних стрижнів були такого ж діаметру - 12,70 мм, але довжиною 230 мм. Один кінець анкера арматурного стержня був зроблений конусоподібним.

Було використано три типи склеювальних матеріалів від різних виробників. Хімічний склад матеріалу зазначений у паспорті якості. Кожен клейовий матеріал коротко описаний нижче.

Матеріал 1: епоксидна смола з амінним затверджувачем

Матеріал 2: Бісфенольна епоксидна смола з амінним затверджувачем

Матеріал 3: Уретанметакрилатна смола з затверджувачем дибензоїлпероксид

2.3 Підготовка зразків для випробувань

Клейові анкери, що використовуються в транспортних конструкціях, піддаються впливу широкого діапазону температур протягом усього терміну служби, тож тести проводяться від -18°C до 49°C . Адгезивна поведінка чутлива до коливання температури, що може вплинути на міцність з'єднання. Властивості бетону також змінюються при коливаннях температури, тоді як властивості сталі в обраному температурному діапазоні випробувань можна вважати постійними.

Щоб дослідити такі умови, Матеріал №1 і Матеріал №2 були встановлені при мінімальній температурі -5°C і максимальній температурі 41°C . Температури тестування були обрані в межах -18°C і 49°C , щоб змодельовати екстремальні робочі температури в яких анкерна система може працювати протягом усього терміну служби.

Усі випробувальні зразки були підготовлені відповідно до [8] та їх відповідних рекомендацій виробника з незначними змінами.

Зразки бетону набрали повної міцності при температурі від 18°C до 29°C , як зазначено [8].

Для свердління отворів у бетонних зразках під анкери використовували перфоратор Makita HR2470 з твердосплавними буром по бетону. Були зроблені отвори діаметром 14 мм під матеріал №1 та отвір діаметром 16 мм під матеріал №2 відповідно рекомендаціям виробника.

Анкерні отвори були очищені перед встановленням анкерів та клейових матеріалів згідно з інструкціями виробника. Всі отвори продувались стисненим повітрям, перш ніж використовувати дротяну щітку для додаткового очищення частинок пилу. Все це було зроблено для кращого зчеплення поверхні бетону і анкера. Підготовлені бетонні моноліти з отворами зображені на рисунку 2.2.

					MP 2119211 ПЗ	Аркуш
						18
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		



Рис. 2.2 Зразки бетону з просвердленими отворами під анкери

Таблиця 2.2

Процедура очищення отворів для всіх клейових матеріалів

Номерація к.м.	Очищення отворів від пилу під кожен к.м.
К.м. №1	• Продування стисненим повітрям (2х) • Обробка отвору за допомогою дротяної щітки (2х) • Продування стисненим повітрям (2 рази)
К.м. №2	• Продування стисненим повітрям (4х) • Обробка отвору за допомогою дротяної щітки (4х) • Продування стисненим повітрям (4х)
К.м. №3	• Продування стисненим повітрям (2 рази) • Обробка отвору за допомогою дротяної щітки (2х) • Продування стисненим повітрям (2 рази)

Всі анкери будуть встановлені відповідно до інструкцій виробника клейових матеріалів. Анкери були очищені одноразовою ганчіркою перед встановленням, щоб видалити будь-які пил і жир, які можуть перешкоджати зчепленню клею з анкером.

Клейові матеріали являють собою двокомпонентні хімічні системи, упаковані в картриджі. Перед початком роботи насадка, яка іде в комплекті, прикручується до картриджа, приблизно перші 10 см клейового матеріалу не використовуються. Так як матеріал двокомпонентний, він проходить через спеціальну насадку і змішується. Коли суміш стає однорідною, вона готова до використання. В бетоні заповнюються отвори на $\frac{2}{3}$, починаючи з дна.



Рис. 2.3 Анкер з різьбою

Клей було розподілено рівномірно в отвір, анкери, зображені на рисунку 2.3, були вставлені одразу. Як тільки анкер був вставлений, його потрібно обернути за годинниковою стрілкою, щоб усунути повітряні проміжки та забезпечити повне покриття анкера клеєм.

Після завершення затвердіння будь-який надлишок затверділого клею навколо анкера над поверхнею бетону потрібно прибрати.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

2.4 Випробування бетону на міцність в лабораторних умовах

Визначення міцності та модуля пружності бетону безпосередньо в конструкціях і спорудах необхідно в зв'язку з забезпеченням їх надійності і довговічності в процесі будівництва, реконструкції та експлуатації, для встановлення фактичної несучої здатності, уточнення розрахункових коефіцієнтів запасу і контролю за їх напруженим станом.

Розвиток досліджень в області контролю якості призвів до появи значної кількості методів оцінки міцності бетону. Кожен з існуючих методів має певну область застосування, свої переваги і недоліки.

Контроль міцності бетону за результатами випробувань на стиск [16, 17] зразків кубів не може повністю задовольняти працівників лабораторій, проєктувальників і будівельників, тому що результати випробувань зразків не завжди відображають дійсну міцність бетону у виробках і конструкціях.

Сутність методів: міцність бетону визначають вимірюванням мінімальних зусиль, що дають вибурені або випиляні з конструкцій зразки бетону при їх статичному навантаженні з постійною швидкістю зростання навантаження, і подальшому обчисленні напружень при цих зусиллях, беручи до уваги припущення щодо пружної роботи матеріалу.

Метод зразків полягає в тому, що при виготовленні виробу з бетону, із того самого замісу створюють контрольні зразки кубічної форми. Потім зразок встановлюють у прес і безперервно навантажують до руйнування.

Перед випробуванням зразки оглядають, встановлюючи наявність дефектів у вигляді тріщин, сколів ребер, раковин і сторонніх включень, а також слідів невідповідності стандарту бетонної суміші. Результати візуального огляду записують у журнал випробувань.

В разі необхідності фіксують схему розташування і характеристику дефектів, і, відповідно до ДСТУ Б В.2.7-7:2008 [10], приймають рішення про можливість випробування зразків або про їх відбракування. На зразках вибирають і відзначають межі, до яких повинні бути прикладені зусилля в процесі навантаження.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						21
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

При цьому опорні грані зразків-кубів, призначених для випробування на стиснення, слід вибирати так, щоб стискаюча сила при випробуванні збігалася з напрямком сили стискання, що діє при експлуатації на конструкцію.

Площину згину зразків-призм при випробуванні на розтяг при згині слід вибирати так, щоб вона збігалася з площиною згину конструкції при її експлуатації. Результати вимірювань лінійних розмірів зразків записують в журнал випробувань.

Перед випробуванням зразки зважують для визначення їх середньої щільності по [10]. Всі зразки однієї серії повинні бути випробувані в одній процедурі.

Проведення випробувань:

Випробування зразків на стиск і всі види розтягу, а також вибір схеми випробування і навантаження проводять згідно з [10].

Міцність бетону випробуваного зразка з точністю до 0,1 МПа, при випробуванні на стиснення і з точністю до 0,01 МПа, при випробуваннях на розтягнення обчислюють за формулами:

- на стиск;
- на осьовий розтяг;
- на розтяг при розколюванні;
- на розтяг при згині.

Застосування руйнівних методів при експертній оцінці міцності матеріалу в реальних конструкціях важке, а часто просто неможливе, так як процес вилучення зразків з конструкції для випробування пов'язаний з певними труднощами.

Кількість зразків, як правило, буває обмеженим, причому в них не завжди вдається зберегти непорушеною структуру матеріалу. В процесі випилювання виникають мікроруйнування, отримана міцність на поверхні зразка може бути занижена. Крім того, сам процес вилучення зразків пов'язаний з травмуванням конструкції.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		22

2.5 Метод ударного імпульсу

Для вимірювання міцності бетону часто використовують метод ударного імпульсу [18] - найбільш поширений варіант, який дає можливість виявити клас бетону, виконуючи дослідження під різними кутами до поверхні, з урахуванням пружності і пластичності матеріалу.

Електромеханічний перетворювач перетворює механічну енергію виконаного удару в електричний імпульс, реальні результати отримують в одиницях визначення міцності на стиск. Для досліджень використовують молоток Шмідта.

У випробуваннях використовують склерометри - спеціальні пружинні молотки зі сферичними штампами. За рахунок системи пружин реалізується вільний відскок після удару. Фіксація шляху ударника при відскоку здійснюється за шкалою зі стрілкою.

Міцність матеріалу визначають за градувальними кривими, що враховують положення молотка, адже величина відскоку безпосередньо залежить від напрямку удару.

Середній показник досліджень вираховують за даними 5-10 виконаних вимірювань, між місцями ударів відстань має дорівнювати мінімум 3 сантиметри. Діапазон вимірювань методів складає 5-50 МПа, використовуються спеціальні прилади.

Головні переваги: простота і швидкість досліджень, можливість оцінити міцність густоармованих виробів. Недоліки: визначення міцності бетону реалізується в поверхневому шарі глибиною 2-3 сантиметри, перевірки потрібно робити часто і багато.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						23
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		



Рис. 2.4 Склерометр МШ-225

Таблиця 2.3

Технічні характеристики склерометра

Назва	МШ-225	МШ-75	МШ-20
Діапазон вимірювання міцності, МПа	10-60	10-60	1-25
Енергія удару, Дж	2207	735	196
Мінімальна товщина об'єкта контролю, мм	Від 70 і більше	від 50 до 100	Від 30 і більше
Похибка вимірювання міцності, %	10		
Твердість робочої поверхні, HRC	Не менше 60		
Шорсткість об'єкта контролю, Ra	Не гірше 40		
Радіус індентора, мм	25		
Робочий діапазон температур, ° C	-20...+55		

2.6 Метод пластичної деформації

Перевірка міцності бетону методом пластичної деформації – це найдешевший спосіб, який визначає твердість поверхні бетону виміром сліду, залишеного сталевим стрижнем / кулькою, що вбудований в молоток.

Молоток розташовують в перпендикулярній площині поверхні, роблять пару ударів. Відбитки на бетоні і бойку вимірюють. Отримані дані фіксують, шукають середнє значення, за отриманим співвідношенням розмірів відбитків визначають характеристики бетонної поверхні.



Рис. 2.5 Молоток Кашкарова

Молоток Кашкарова - це вимірювальний прилад, який здатний визначити показник, який вказує міцність бетону на стиск шляхом пластичних деформацій.

Незважаючи на те що даний прилад дає досить неточні показники, він часто застосовується на будівельних майданчиках, де виконують монолітні роботи, а також на заводах залізобетонних конструкцій.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

2.7 Фізичні методи неруйнівного контролю

Теоретичними дослідженнями встановлено, що швидкість поширення пружних ультразвукових коливань є характеристикою, функціонально пов'язаною з такими важливими властивостями, як пружність і щільність матеріалу. Тому за швидкістю поширення ультразвукових хвиль можна оцінити якість будівельного матеріалу і його стан. Найбільш простим і досить надійним способом визначення модуля пружності бетону є застосування порівняльного ультразвукового методу випробувань. Порівняльний метод заснований на використанні кореляційних (статичних) зв'язків між швидкістю поширення ультразвукових коливань і початковим (статичним) модулем пружності бетону $E_0 = f(c)$. Ці зв'язки встановлюються на партії бетонних зразків, що пройшли акустичні, тензометричні та механічні випробування. Однак вищевказаний спосіб не враховує вплив вологості бетону в конструкціях споруд на швидкість поширення в ньому ультразвукових коливань (УЗК).

Експериментально встановлено, що зі збільшенням вологості бетону значно зростає швидкість поширення в ньому УЗК. Тому визначення модуля пружності вологого бетону в існуючих конструкціях, наприклад гідротехнічних або гідромеліоративних споруд, а також фундаментів, що знаходяться в експлуатації, будівель і різних споруд при близькому заляганні рівня ґрунтових вод по градувальній залежності, експериментально встановленої за результатами ультразвукових, тензометричних і механічних випробувань бетонних зразків природної вологості (0 - 1,5%, тобто практично «сухого» бетону), здійснюється з великою похибкою, величина якої складає приблизно 15 - 75%.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						26
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

2.8 Метод ультразвукового вимірювання

Застосування неруйнівних методів контролю міцності бетону є вкрай потрібним в практиці будівництва, оскільки дуже часто необхідно встановити клас бетону в конструкціях, для яких немає ніяких контрольних зразків. В такому випадку необхідно визначити міцність бетону у великій кількості конструкцій, неруйнівний контроль при цьому помітно знижує вартість обстеження, якщо порівнювати з суцільним випробуванням «напівруйнівним» методом відриву зі сколюванням (щонайменше по два відриви на конструкцію) або з вибурюванням циліндричних зразків із тіла конструкції.

Ультразвуковий метод визначення міцності бетону [19] відноситься до фізичних неруйнівних методів контролю якості бетону. Він заснований на зв'язку між швидкістю поширення ультразвукових коливань (частотою понад 20 кГц) в бетоні і його щільністю, динамічним модулем пружності та міцністю.

Швидкість поширення ультразвуку в бетоні велика, до 4500 м/с. Градувальну залежність між швидкістю поширення ультразвуку та міцністю бетону на стиск визначають попередньо для конкретного складу бетону. Це пов'язано з тим, що застосування градувальних залежностей для бетонів інших або невідомих складів може привести до помилок у визначенні міцності. На залежність «міцність бетону – швидкість ультразвуку» впливають такі фактори, зміну яких потрібно враховувати при застосуванні ультразвукового методу контролю:

- кількість і зерновий склад заповнювача;
- зміна витрати цементу більш, ніж на 30%;
- спосіб приготування бетонної суміші;
- ступінь ущільнення бетону;
- напруження всередині бетону.

Ультразвуковий метод дозволяє багаторазово здійснювати масові випробування виробів будь-якої форми, вести безперервний контроль

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						27
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

наростання або зниження міцності. Недоліком методу є похибка при переході від акустичних характеристик до міцності.

Для ультразвукового контролю міцності бетону використовуються спеціально розроблені прилади. У якості прикладу розглянемо ультразвуковий тестер UK1401, призначений для вимірювань часу і швидкості поширення поздовжніх ультразвукових хвиль в твердих матеріалах при поверхневому прозвучуванні на фіксованій базі з метою визначення міцності і цілісності матеріалів і конструкцій. Оцінка міцності заснована на кореляції швидкості поширення ультразвукових хвиль у матеріалі з його фізико-механічними характеристиками і фізичним станом.



Рис. 2.6 Вимірювач міцності бетону UK1401

Прилад виконаний в моноблочному виконанні в ергономічному корпусі з легкого ударостійкого пластику, що робить його зручним для роботи безпосередньо на будівельних об'єктах.

У корпус UK1401 вбудовані два перетворювачі з сухим точковим контактом і незалежним пружинним підвісом, що дає унікальну можливість вести контроль без застосування контактної рідини з можливістю нормованого

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						28
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

зусилля притиснення приладу. Крім того, ці перетворювачі зносостійкі і не чутливі до стану поверхні, що дозволяє уникнути тривалої і трудомісткої підготовки поверхні для проведення вимірювань.

2.9 Морозильна і теплова камери

Для охолодження та тестування зразків використовувалася морозильна камера об'ємом 320 л. Морозильна камера була оснащена цифровим датчиком температури, який дозволяв встановити внутрішню температуру морозильника в межах від -34°C до 10°C . Для стабілізування навколишньої температури і температури всередині бетонного зразка при -7°C потрібно приблизно 21 година.



Рис. 2.7 Холодильна камера з одним лабораторним зразком всередині

Для підготовки та випробування зразків використовували камеру з контролем температури та вологості. Відповідно до [7] зразки були поміщені в камеру для досягнення температури тестування від 43°C до 49°C з відносною вологістю нижче $50 \pm 10 \%$. Камера нагрівається від комерційного обігрівача з керованим термостатом, який підтримував температуру в камері між 43°C і

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

49°C. Термометри з гумовими пробками були встановлені в отвори зразків, на глибину 3,5 см і використовувалися для перевірки температури зразка.

Випробувальний апарат детально описаний у [6]. Після того, як анкерний стержень був встановлений і витриманий протягом відповідного часу, надлишки клею або цементного розчину були видалені, обмежувальний лист (політетрафторетилен) і сталеву обмежувальну пластину помістили поверх бетону. Поверх сталеві обмежувальної пластини поставили нежорстку стяжку та закріпили на анкері за допомогою високоміцної шестигранної гайки. А сталевий плоский стержень з алюмінієвими кутами, до якого прикріплені датчики лінійного положення серії BEI 9610 були прикріплені, вставлені через нежорстку муфту та закріплені на анкері за допомогою високоміцної шестигранної гайки ASTM A194 2H [11].

2.10 Конструкція та компоненти випробувальної установки

Випробувальний пристрій був розроблений відповідно до вимог [6]. Зібрану установку можна побачити на рисунку 2.8; розрізи запроєктованої установки можна побачити на рисунку 2.9.

Після того, як анкерний стержень був встановлений і витриманий протягом відповідного часу надлишки клею і цементного розчину видаляються, PTFE (політетрафторетилен, синтетичний полімер тетрафторетилену, який являє собою високомолекулярне з'єднання вуглецю і фтору) обмежувальний лист і сталеву обмежувальну пластину помістили поверх бетону.

Нежорстку стяжку поставили поверх сталеві обмежувальної пластини та закріпили на анкері за допомогою високоміцної шестигранної гайки. А сталевий плоский стержень з алюмінієвими кутами, до якого прикріплені датчики лінійного положення, були прикріплені через нежорстку муфту та закріплені на анкері за допомогою високоміцної шестигранної гайки.

					MP 2119211 ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Таким чином, анкерний стержень, який випробовується, проходить через обмежувальний лист, обмежувальну пластину, нежорстку муфту та сталеву плоску трубу ASTM A500 Grade B [12](Стандартна специфікація на холодногнуті, зварні та безшовні конструкційні круглі та профільні труби з вуглецевих сталей) 203,20 x 76,2 x 6,35 мм, потім з обох боків нежорсткої муфти розмістили прокладки, щоб підтримувати сталеву пластину розміром 254,00 мм x 254,00 мм x 25,00 мм з отвором діаметром 70 мм у центрі. 20-тонний (178 кН) гідравлічний домкрат із центральним отвором був встановлений на верхній частині сталеві пластини, а тензодатчик – на верхній частині гідравлічного домкрата.

Нарешті, навантажувальний стержень діаметром 23 мм пропускали через датчик навантаження, гідравлічний домкрат, сталеву пластину та нежорстку муфту та закріпити на муфті шестигранником гайку та шайбу з обох кінців.



Рис. 2.8 Випробувальна установка

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		31

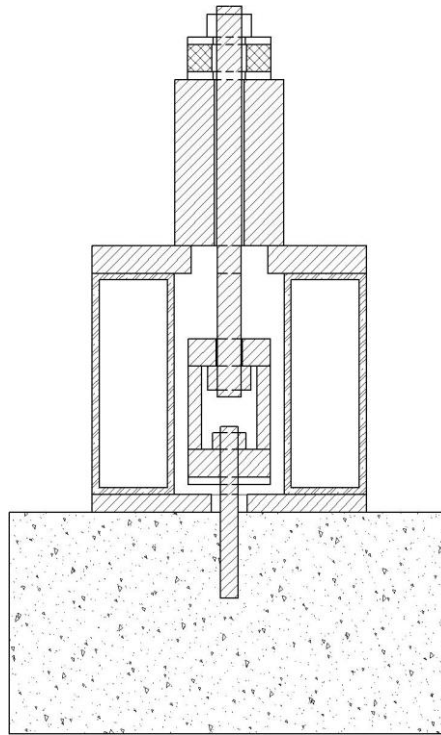


Рис. 2.9 Схематичний розріз випробувальної установки

Міцність навантажувального стержня повинна бути більшою, ніж міцність анкера, щоб гарантувати, що стержень не вирветься перш ніж анкер. Отже, було обрано стержень діаметром 23 мм (матеріал: сталь конструкційна,; аналоговим матеріалом вітчизняного зразка є Ст3кп - Сталь конструкційна вуглецева звичайної якості)

Сталева нежорстка муфта служить для з'єднання анкерного стержня з навантажувальним стрижнем і використовується для зменшення згинальних моментів, прикладених до анкера, дозволяючи обертання в точці підключення. Муфта складається з двох утримуваних пластин товщиною 25 мм, сторони пластини товщиною 12 мм. Оскільки повна потужність усіх пластин необхідна для витримування навантажень до 177,93 кН, для кріплення верхньої та нижньої пластин до бічних плит використовували зварні шви з повним проплавленням. Отвір діаметром 17,5 мм у нижній частині муфти дозволяє пропустити анкерний стрижень, а отвір діаметром 25 мм у верхній частині муфти дозволяє пройти вантажну штангу. Як анкерний стержень, так і навантажувальний стрижень закріплені важкою шестигранною гайкою.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						32
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Для кріплення анкерних стержнів арматурного стрижня до нежорсткої муфти замість важких шестигранних гайок використовувалися спеціальні з'єднувачі. З'єднувачі — це циліндричні пристрої діаметром 35 мм і товщиною 15 мм з отвором у центрі, який звужується від однієї плоскої поверхні до іншої. Отвір має різьбу, щоб забезпечити кріплення відповідного конічного різьбового кінця арматурного стержня.

Сталева пластина товщиною 16,00 мм розміром 203,20 мм х 254,00 мм із центральним отвором діаметром 32 мм використовувалася для обмеження випробувань відповідно до стандарту [7], який вимагає, щоб обмежувальна пластина була більшою або дорівнювала номінальному діаметру анкера $\pm 1,52$ мм. Обмеження випробувань запобігає руйнуванню бетону, що дозволяє більш узгоджено вимірювати руйнування з'єднання.

Обмежувальний лист був розміщений поверх бетонного зразка під обмежувальною пластиною, як вимагає [7], щоб виправити нерівності поверхні. Обмежувальний лист складається з політетрафторетилену товщиною 0,76 мм, що приблизно відповідає розмірам обмежувальної пластини з центральним отвором діаметром 32 мм

Навантаження було прикладено до навантажувальної штанги за допомогою гідравлічного домкрата з робочим зусиллям 178 кН та з центральним отвором. Тиск подається на домкрат за допомогою ручного гідравлічного насоса.

Передавач температури/відносної вологості серії Omega NH93B використовувався для вимірювання температури повітря та відносної вологості під час тестування всередині гарячої камери.

Термістори QTI використовувалися для вимірювання внутрішньої температури кожного досліджуваного зразка, вставляючи термістори в отвір, розташований на бетонній поверхні. Отвори мали діаметр 12,7 мм і глибину 35,56 мм і були закриті гумовою пробкою для більш точного вимірювання температури бетону. Температуру кожного зразка постійно контролювали, щоб забезпечити відповідність методу випробувань.

					MP 2119211 ПЗ	Аркуш
						33
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Датчики лінійного положення серії BEI 9610 використовувалися для вимірювання переміщення анкера. Датчики були прикріплені до алюмінієвих куточків, прикріплених до сталевій плоскій планки, як показано на рисунку 2.10. У центрі плоскої планки було просвердлено отвір, щоб анкерний стержень міг через нього пройти.

Тонкі скельця поміщали під кожен датчик перед тестуванням, щоб забезпечити гладку поверхню. Два датчики використовувалися по обидва боки сталевій плоскій планки, їхні значення були усереднені для врахування неоднорідних показань з кожного боку.



Рис. 2.10 Пристрій для зчитування з двома датчиками, прикріпленими до сталевій плоскій планки

Навантаження на зразок для всіх випробувань вимірювали за допомогою тензодатчика Transducer Techniques THD-50K-Z donut 222,40 кН.

Температуру контролювали для початкової температури бетону, температури твердіння та температури випробування. Зразки, встановлені та витримані при низьких температурах від -7°C до -1°C , витримували в морозильній камері протягом 48 годин: 24 години, щоб досягти температури

					MP 2119211 ПЗ	Аркуш
						34
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

морозильника, і додаткові 24 години, щоб дійти відповідного стану для експерименту. Зразки, встановлені та затверділі при підвищених температурах, поміщали в термокамеру з контрольованою температурою та вологістю і давали стабілізуватися від 43°C до 49°C протягом 24 годин перед початком тестування. Перед свердлінням зразки стабілізували при температурі навколишнього середовища від 18 °C до 29 °C.

Анкери були встановлені та отримали відповідний час для затвердіння відповідно до інструкцій виробника. Після затвердіння зразок піддавався додатковому кондиціонуванню навколишнього середовища до кінцевої температури випробувань протягом 48 годин у морозильній камері або у термокамері.

Для випробування було прийнято початкове навантаження на розтяг 5% від очікуваної кінцевої навантажувальної здатності анкера. Навантаження збільшувалося при постійній швидкості навантаження, вибраній таким чином, щоб анкер зруйнувався протягом 2 ± 1 хвилин. Дані, які включали показання навантаження, температуру та переміщення, збирали з частотою 0,5 секунди з руйнуванням анкера.

На основі зібраних даних для визначення короточасної навантажувальної здатності анкера було створено графік залежності навантаження від переміщення. Вантажопідйомність була визначена як пік кривої, після якого жорсткість анкера значно зменшилася.

2.11 Висновки з розділу

1. Для випробувань розроблена конструкція зразків, яка складається з бетонного циліндричного моноліту з просвердленим у центрі отвором, до якого вклеєно сталевий анкер. Розміри зразків відповідають реальним розмірам анкерів та забезпечують можливість проведення випробувань без руйнування бетонного масиву зразка.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						35
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

2. Характеристики міцності бетону оцінювалися шляхом випробування бетонних зразків, неруйнівними методами пластичної деформації та ультразвуковими методами.

3. Розроблена дослідна установка забезпечує можливість висмикування анкера за допомогою гідравлічного домкрата з одночасним контролем зусилля та переміщень анкера відносно бетонного моноліту.

4. Зразки для випробувань підготовлені відповідно до вимог чинних стандартів з урахуванням можливих у процесі експлуатації температурно-вологісних умов, які створювалися в спеціальній камері.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		36

Розділ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ БЕТОННИХ ЗРАЗКІВ ІЗ ВКЛЕСНИМИ АНКЕРАМИ

3.1 Результати фізичних випробувань

Цей розділ містить результати випробувань на висмикування анкера за екстремальних температур, призначених для подальшої верифікації результатів моделювання методом скінченних елементів.

Усі випробування на висмикування анкера проводилися з урахуванням специфікацій виробника анкерів. Незважаючи на те, що в програмі випробувань враховувалося запобігання руйнуванню сталі, під час багатьох випробувань матеріалу 1 анкер входив у пластичну стадію раніше, ніж руйнувався клей. Цей матеріал продається як покращена версія матеріалу №2. Повідомляється лише про випробування з руйнуванням адгезиву, але зазначається, що анкери могли перейти у пластичну стадію у всіх зразках, тому результати вимірювань зміщення є комбінацією деформації адгезиву та пластичності сталі. Анкер із пошкодженням клею у нижній частині показаний на рисунку 3.1.

Очікувалося, що високоміцні сталеві анкери матимуть несучу здатність не менше 80 кН. Однак несуча здатність матеріалу 1 перевершила міцність анкера в багатьох тестах. Таким чином, у багатьох випадках переміщення, виміряні перетворювачами, пов'язані не лише з адгезивом, але й з пластичністю сталі. Нарешті, не вдалося встановити переміщення кількох зразків через помилки в приладах.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						37
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		



Рис. 3.1 Порушення клею в анкері

3.2 Матеріал №1

Загалом було виявлено, що анкерні системи з різьбовими стрижнями з матеріалом №1 після затвердіння відповідно до специфікацій виробника мають незмінно високу несучу здатність як при низьких, так і при високих температурах.

Попередні випробування на висмикування згідно з [6] і [7] показали, що матеріал №1 руйнується в середньому при 89,41 кН з коефіцієнтом варіації 7%. Для порівняння, під час затвердіння при -4 °C матеріал №1 вийшов з ладу при середньому навантаженні 95,99 кН і 97,37 кН, під час випробувань при -4 °C і -18 °C відповідно. Крім того, під час випробувань при 43 °C до 49 °C матеріал №1 вийшов з ладу при 95,41 кН і 92,97 кН, як показано на рисунку 3.2. Це показує, що незалежно від температури затвердіння та випробування матеріал №1 демонструє несучу здатність, яка рідко опускається нижче значень, зазначених в специфікаціях виробника. Винятком є випадки, коли матеріал №1 при -18 °C, зруйнувався при навантаженні в 77,35 кН.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						38
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Після затвердіння та випробування при нижчих температурах міцність матеріалу №1 збільшується приблизно на 10%, що узгоджується з адгезійною поведінкою при низьких температурах, тоді як несуча здатність страждає. Однак слід зазначити, що сталевий анкер не витримав майже 50% випробувань матеріалу №1, що означає, що несуча здатність матеріалу №1 фактично більша, ніж спостерігалось.

Руйнування сталі також вплинуло на проведені вимірювання переміщення, при якому два зразки показали набагато вищі переміщення через датчики, які зчитували текучість сталі на додаток до деформації епоксидної смоли. Руйнування сталі в подальших випробуваннях не спостерігається.

Загалом, матеріал №1 не демонстрував значних змін у жорсткості у результаті змін температури. Невеликі зміни в жорсткості відбулися в даних, представлених на рисунку 3.4; однак для кращого вивчення результатів слід провести більше випробувань. Деформація клей при різних температурах в середньому становить 1,7 мм – 2 мм

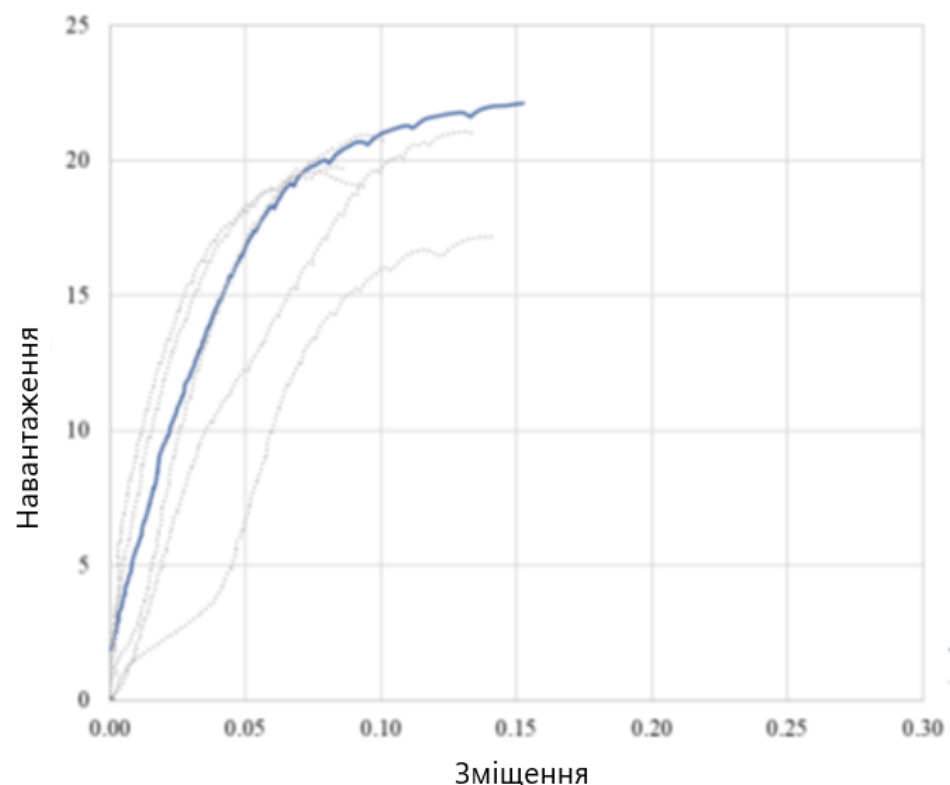


Рис. 3.2 Матеріал №1 Випробування при 43 °C до 49 °C

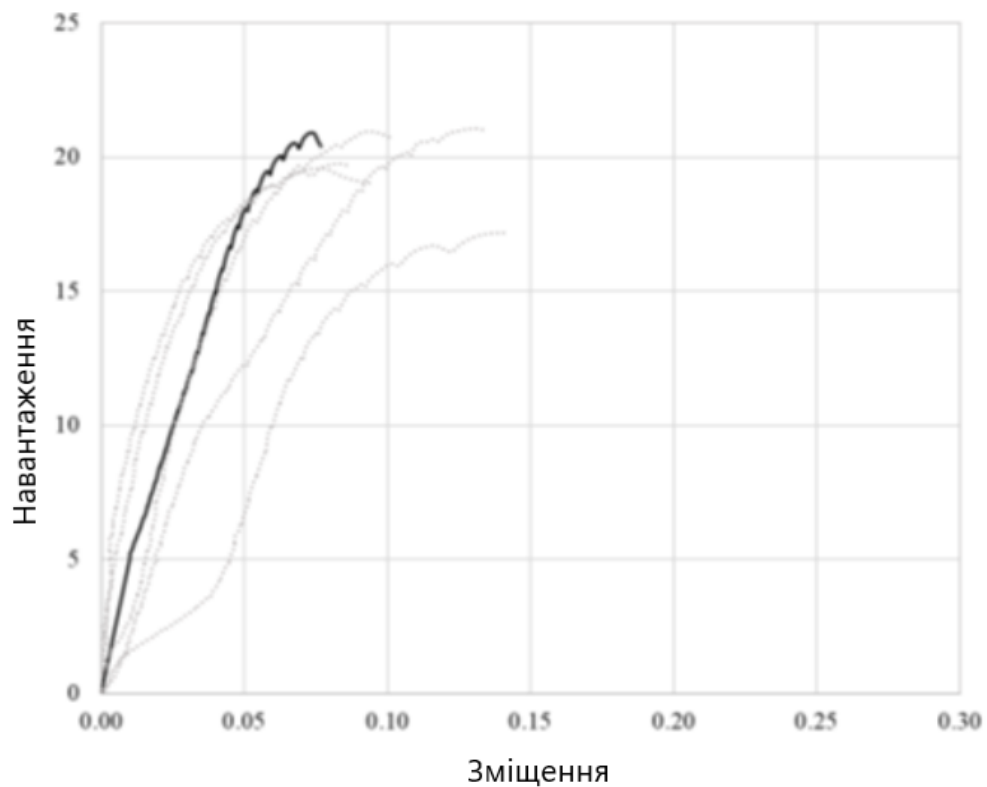


Рис. 3.3 Матеріал №1 випробувано при температурі навколишнього середовища

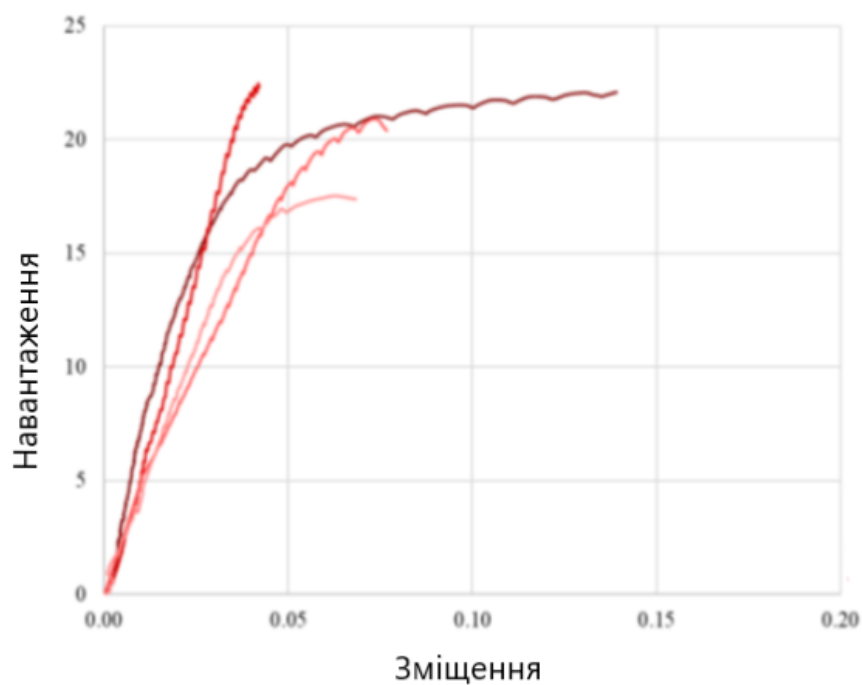


Рис. 3.4 Жорсткість матеріалу №1 за різних температур

3.3 Матеріал №2

Матеріал №2, тобто клей, розроблений спеціально для застосування при низьких навколишніх температурах, показав хороші результати під час затвердіння та встановлення при відповідних температурах, але значно гірше себе проявив при підвищенні температури. За результатами проведених статичних випробувань було встановлено, що матеріал 2 витримує середнє навантаження в 90,49 кН при коефіцієнті варіації 4%.

Після затвердіння при -7°C і випробувань при -18°C , матеріал №2 вийшов з ладу при середньому навантаженні 91,41 кН. Матеріал №2 також продемонстрував збільшення міцності під час затвердіння та випробування при -1°C , витримуючи середнє навантаження 93,99 кН, як показано на рисунку 3.5. Деформації матеріалу №2, протестованого при низьких температурах, становили в середньому від 1,2 мм до 2 мм.

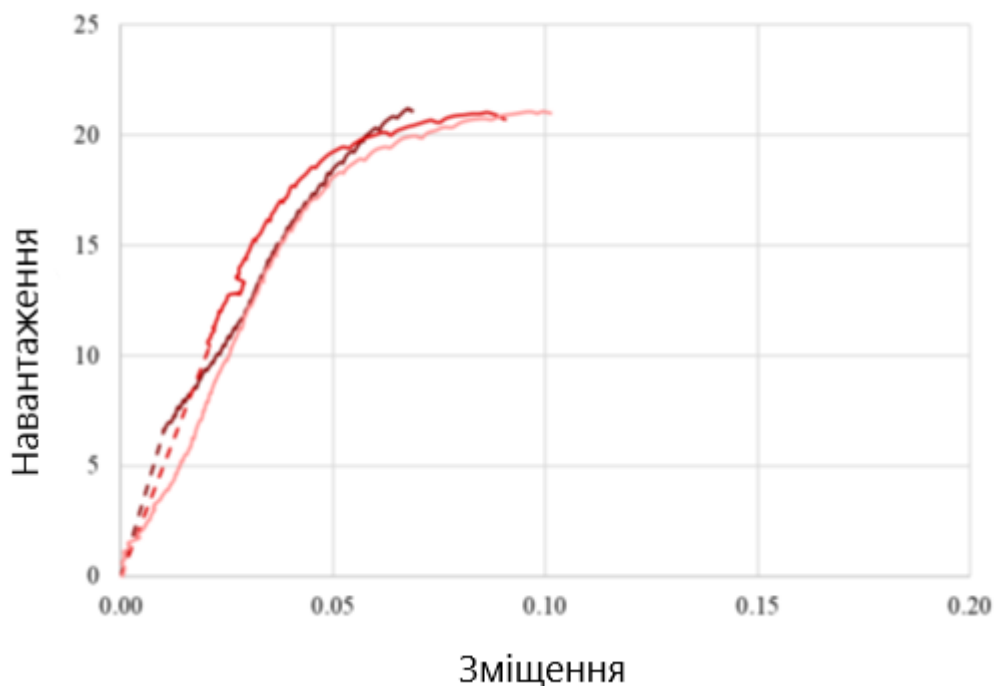


Рис. 3.5 Матеріал №2 при -1°C

Після затвердіння та випробувань при низькій температурі навколишнього середовища матеріал №2 загалом продемонстрував вищу міцність, ніж матеріал №1, але нижчу міцність, ніж при затвердінні та

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						41
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

випробуваннях при високих температурах. Наприклад, після затвердіння та випробуваннях за температури навколишнього середовища з початковою температурою бетону -1°C , матеріал №2 вийшов з ладу при середньому навантаженні 86,56 кН, як показано на рисунку 3.6. Подібним чином, на рисунку 3.6, матеріал №2 під час затвердіння та випробування при температурі навколишнього середовища з початковою температурою бетону -7°C вийшов з ладу при середньому навантаженні 82,69 кН.

Зміщення матеріалу №2 під час випробування за температури навколишнього середовища становили в середньому від 2 мм до 2,5 мм. Загалом матеріал №2 продемонстрував меншу жорсткість під час випробувань при високій температурі навколишнього середовища, ніж при випробуваннях при низькій температурі, що підтверджує поведінку клейових матеріалів при мінливих температурах.

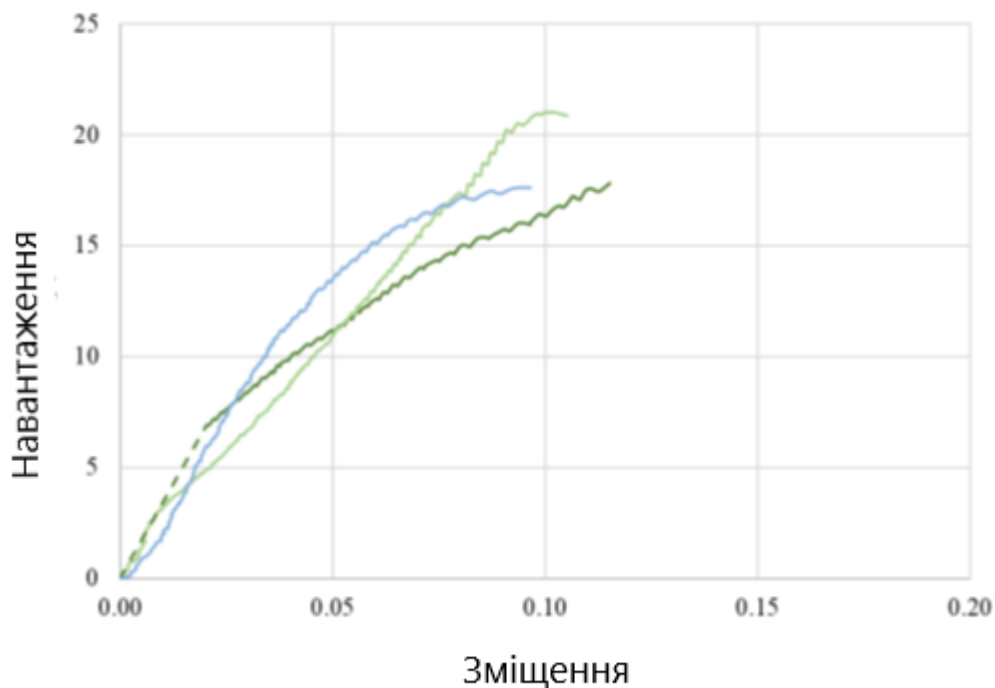


Рис. 3.6 Матеріал №2 при температурі навколишнього середовища

Під час випробувань при підвищеній температурі від 43°C до 49°C , як показано на рисунку 3.7, матеріал №2 продемонстрував знижену міцність в обох випадках. Були отримані результати 75,31 кН і 76,42 кН відповідно. Такі

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						42
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

результати очікувані завдяки тому, що матеріал №2 розроблено спеціально для твердіння при більш низьких температурах навколишнього середовища. Спостерігалось зміщення на 2 мм, а також зниження жорсткості, ніж при випробуванні при низькій температурі та при температурі навколишнього середовища, що додатково підтверджує очікувану поведінку клеїв.

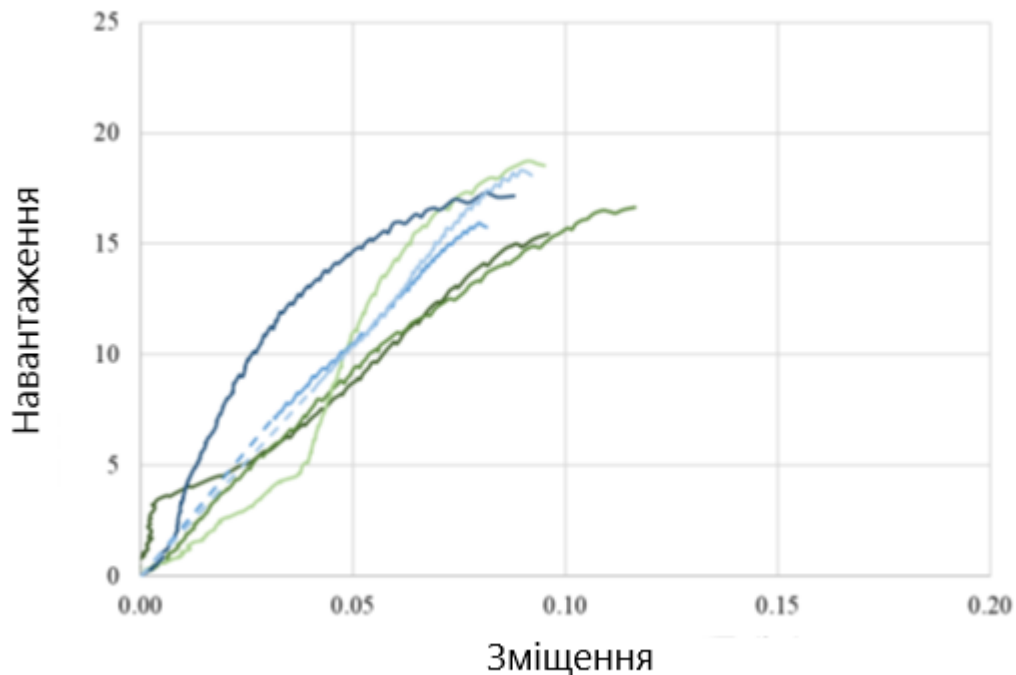


Рис. 3.7 Навантаження і переміщення Матеріалу №2 (при температурі від 43 °С до 49 °С)

3.4 Матеріал №3

Матеріал №3, епоксидний клей з амінним отверджувачем, має середню міцність 81,54 кН і коефіцієнт варіації 6%. Для порівняння зразки матеріалу №3 затверділи при температурі навколишнього середовища та протестовані при -18 °С. В одного екземпляра зруйнувався сам анкер тому його не враховували. Інший зразок зруйнувався при 86,34 кН. Спостерігається деформація у 2,5 мм; однак слід зазначити, що зразок в якого зруйнувався анкер, витримував приблизно таке ж навантаження, тому велике значення деформації могло бути спричинене текучістю сталі.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						43
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Під час затвердіння та випробувань при високій температурі від 43 °С до 49 °С матеріал №3 зруйнувався при навантаженні 88,51 кН. Збільшення несучої здатності не відповідає адгезивній поведінці. Матеріал №3, протестований при високій температурі, має меншу жорсткість, ніж при низькій температурі. Загалом, більше тестів слід проводити як при низькій, так і при високій температурі, щоб зібрати більше даних для кращого дослідження поведінки матеріалу №3.

3.5 Випробування арматурного стержня на висмикування

Матеріал №3 було випробувано з анкерами для арматурних стрижнів і порівняно з короточасними випробуваннями на висмикування, проведеними з різьбовими анкерами. У випробуваннях, було виявлено, що середнє навантаження матеріалу №3 для стрижня з різьбою становило 81,54 кН зі стандартним відхиленням 1,00 і коефіцієнтом варіації 5%. Для випробувань арматурного стрижня було виявлено, що матеріал №3 витримує навантаження 89,32 кН зі стандартним відхиленням 1,56 і коефіцієнтом варіації 7%.

Загалом випробування арматурного стержня продемонстрували вищу несучу здатність, ніж під час випробування різьбового стержня. Виступи на арматурному стержні могли вплинути на з'єднання клею зі сталлю, забезпечивши 10% збільшення місткості стрижня. Крім того, високі зміщення, дані випробуваннями арматурного стрижня, можливо, вказують на податливість анкера, чого не було під час випробувань різьбового стрижня; це може бути пов'язано з термічною обробкою арматурного стрижня, для якої немає гарантії, що міцність арматурного стрижня відповідає вищій міцності різьбового стержня.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						44
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

3.6 Винятки щодо специфікацій виробника

Кілька випробувань було проведено поза специфікаціями виробника, щоб спостерігати за несучою здатністю та зміщенням клеїв за екстремальних робочих температурних умов, за яких клею не було достатньо часу для повного затвердіння. Крім того, кілька анкерів затверділи при температурі, нижчій або вищій за вказану виробником температуру. Матеріал №1 і матеріал №3 показали значне зниження здатності втримати анкер в обох випадках.

Зразки матеріалу №1, які затверділи при -4 °C протягом 36 годин, менше ніж у специфікаціях виробника, і випробувані при -18 °C дали середнє навантаження 51,47 кН, зменшення на 45% нижче зазначених в попередніх тестах. Ці зразки зруйнувались при зміщенні в 0,76 мм, і демонструють приблизно таку саму жорсткість, як і інші випробування матеріалу №1, але при значно нижчій несучій здатності.

Зразки матеріалу №3, затверділи при -4 °C і випробувані при -18 °C, затверділи при температурах нижче рекомендованих виробником. Ці зразки вийшли з ладу при середньому навантаженні 46,53 кН або на 44% нижче від тестів, при зміщенні 0,76 мм.

Зразки матеріалу №2, протестовані при підвищеній температурі від 43 °C до 49 °C, затверділи вище температури, рекомендованої виробником. Матеріал №2 продемонстрував значну втрату несучої здатності, зруйнувавшись при середньому навантаженні 69,44 кН або на 12% менше, ніж в тестах, що збігається із загальним спостереженням, що матеріал №2 має найвищу продуктивність при низькій температурі та втрачає міцність при підвищенні температури.

Загалом, відсутність часу для достатнього затвердіння матеріалів, а також затвердіння за межами заявлених виробником температур, може серйозно погіршити несучу здатність, як і очікувалося. Це підкреслює важливість перевірки в області не тільки температур монтажу, але й температур протягом усього терміну затвердіння, який може становити до 7 днів рівні рекомендованої температури монтажу для матеріалів.

					MP 2119211 ПЗ	Аркуш
						45
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

3.7 Узагальнення результатів випробувань та висновки з розділу

1. Були проведені експериментальні випробування зразків бетонних монолітів з вклеєними анкерами, конструкція яких описана в розділі 2. За даними роботи [2] у результаті випробувань отримані характеристики зусиль висмикування анкерів, узагальнені в наступній таблиці:

Матеріал клейового шару	Температура випробувань °C	Показники випробувань кН	Величина зміщення мм	Несуча здатність, кН	
				середнє	варіація
Матеріал 1 – епоксидна смола з амінним отверджувачем	-4°C ; -18°C	95,99 97,37	2 мм	95,43	7%
	43°C ; 49°C	95,41 92,97	2 мм		
Матеріал 2 – бісфенольна епоксидна смола з амінним отверджувачем	-7°C ; -18°C	91,41	Від 1,2 мм до 2 мм	87,05	4%
	7°C	82,69	Від 2 мм до 2,5 мм		
Матеріал 3 – уретанметакрилатна смола отверджувачем дибензоїлпероксид	-18°C	88,51	1,4 мм	87,42	6%
	43°C ; 49°C	86,34	2,5 мм		

2. Наведені результати випробувань вказують на те, що найкраще при низьких температурах показав себе матеріал №2, так як в його специфікації і вказано саме що його бажано використовувати при низьких температурах, але відповідно найгірший результат отримано ним же при плюсових значеннях температури.

3. Наведені в таблиці середні значення несучої здатності анкерів можуть використовуватися для верифікації методики і результатів скінчено-елементного моделювання роботи клейових анкерів.

Розділ 4

МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ АНКЕРІВ

4.1 Скінчено-елементне моделювання

Великою перевагою використання методу скінченних елементів для вирішення інженерних задач є можливість моделювати та наближено аналізувати конструкції складної геометрії без необхідності використання дорогого обладнання та матеріалів. Поведінку матеріалів за різних умов можна спостерігати та аналізувати в більш гнучкому та зручному середовищі, включаючи вплив температури на міцність клейового з'єднання. Однак наближений характер скінчено-елементного моделювання вимагає належної верифікації результатів. Для цього проведена перевірка шляхом порівняння результатів моделювання методом скінченних елементів з результатами фізичних випробувань, а також шляхом порівняння результатів з відомою з літератури поведінкою клейового анкера при руйнуванні.

Для проведення цього дослідження використовувався ANSYS 18.2 Workbench і його вбудована програма геометрії SpaceClaim 18.2. Щоб порівняти результати, отримані за допомогою скінчено-елементної моделі, з результатами експериментальних досліджень, параметри скінченної моделі були визначені так, щоб вони були максимально схожі на параметри описаного в попередньому розділі фізичного зразка для випробувань. Такі фактори, як задекларовані властивості клею, вимагають деяких припущень щодо скінченних елементів з метою їх наближення до результатів експериментальних випробувань. На нашу думку, незначні відмінності у властивостях одного з трьох матеріалів (бетон, сталь, клей) не повинні сильно змінювати загальну поведінку змодельованого зразка. Це дозволяє припустити, що результати моделювання повинні бути порівнянними з результатами експерименту.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						47
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

4.2 Модель скінченних елементів

Скінчено-елементна модель клейової анкерної системи — це повна 3D-модель, створена у вбудованій програмі геометрії ANSYS 18.2 SpaceClaim 18.2. Геометрія складається з чотирьох компонентів: бетонного елемента, сталевго стержня з різьбленням або арматурного стержня-анкера, клейового шару та сталевго обмежувальної пластини. Геометрія моделі арматурного стержня та розріз цієї моделі показані на рис. 4.1. Як модель різьбового стержня (РС), так і модель арматурного стержня (АрС) були розділені на два варіанти: варіант з клейовим покриттям нижньої частини анкерного стержня (з КП) і варіант без клейового покриття (без КП).

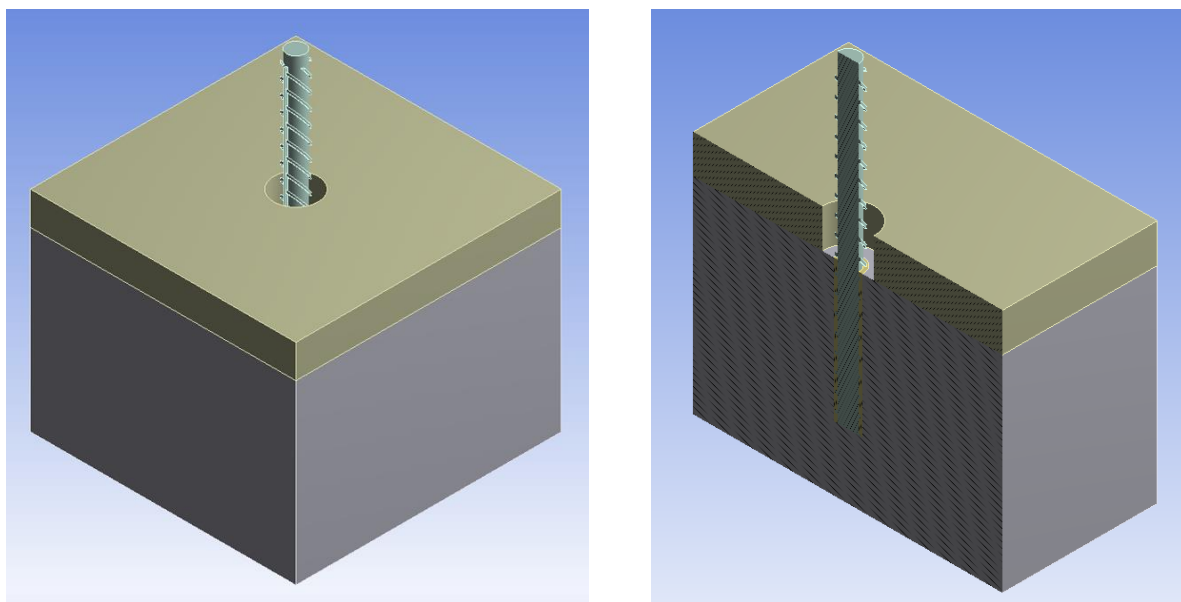


Рис. 4.1 Повна геометрія з арматурним анкером (АрС)

Геометрія бетону складається з блоку 15,24 см x 15,24 см x 7,62 см, показаного на рисунку 4.2. [6], передбачає, що глибина бетонного елемента має бути принаймні в 1,5 рази більшою за глибину закладання анкера.

Однак у попередніх моделях було виявлено, що у разі застосування обмежувальної пластини при розтягу анкера вплив бетонного елемента виявився незначним. Таким чином, глибина бетонного елемента була скорочена, щоб зменшити розмір сітки та оптимізувати час роботи моделі.

У верхній частині блоку було вирізано отвір діаметром 1,58 см для розміщення анкера та клейового шару, який огортає анкер. У подальших випробуваннях у верхній частині бетону було вирізано отвір діаметром 2,22 см, щоб оцінити вплив більшого діаметра отвору на поведінку клейового шару.

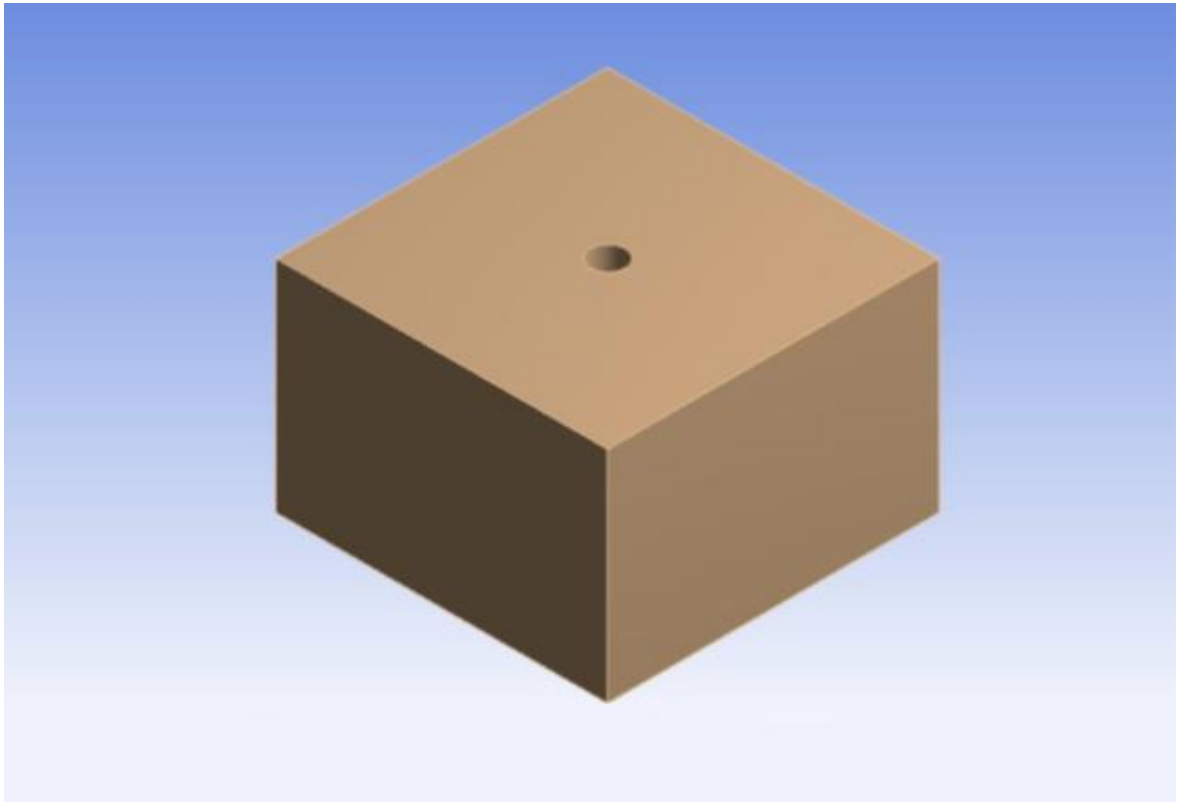


Рис. 4.2 Геометрія бетону

Геометрія стержня з різьбою змодельована як гладкий циліндр діаметром 1,3 см і довжиною 15 см. Анкер із стрижневою різьбою вставляється в бетонний блок на 7 см, щоб порівняти його з фізичним зразком, який відповідає мінімальній глибині закладення.

Нитки на стрижні з різьбою не були змодельовані через їхню велику кількість, яка, як припускали, забезпечує еквівалентну передачу сили по всій глибині анкера, достатню для імітації повністю скріпленої поверхні. Очікується, що відмінності в результатах між повністю змодельованим різьбовим стержнем і гладким різьбовим стержнем будуть незначними.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						49
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

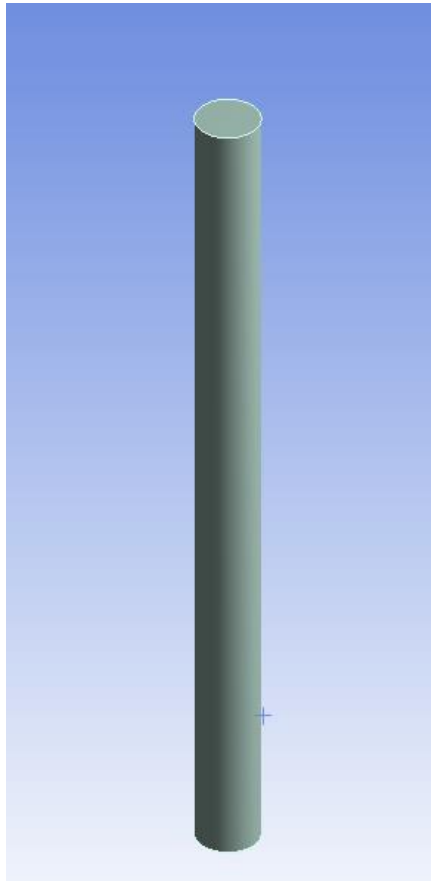


Рис. 4.3 Модель анкера з різьбовою шпилькою

Геометрія арматурного стержня, показаного на рисунку 4.4, складається зі стержня діаметром 1,3 см з виступами 0,32 см x 0,32 см, які утворюють спіралі під кутом 45 градусів від осі X уздовж довжини поверхні стержня. Два поздовжні ребра тягнуться вниз по стержню з протилежних сторін. Спочатку арматурний стержень моделювався як гладкий циліндр, а потім один за одним були додані вушка, розташовані на відстані 0,65 см один від одного. Для відповідного порівняння арматурного стержня з анкером та стержня з різьбою, анкер для арматурного стержня має довжину 15 см і вставляється в бетонний блок на 7 см. Розмір вушок було взято з вимірювання профілю арматури, яка використовувалася для фізичних випробувань.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						50
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

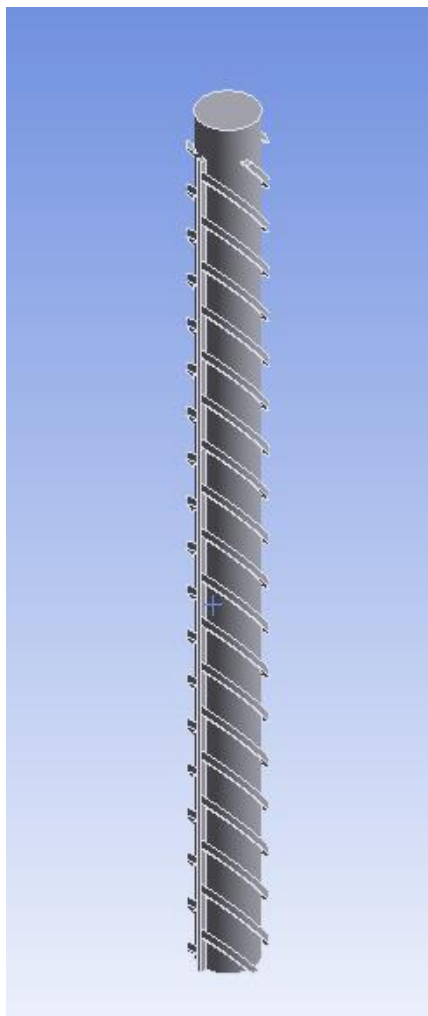


Рис. 4.4 Модель арматурного анкера

Як для моделі анкера з різбовим стержнем, так і для моделі анкера з арматурним стержнем шар клею моделюється так, щоб огортати анкер на глибині 7 см. Однак товщина клейового шару різниться між двома моделями через додавання виступів на арматурному стержні. Крім того, для кожної моделі було створено дві версії клейового шару для подальшого аналізу поведінки адгезиву: одна без клейового покриття на нижній частині анкера та інша з клейовим покриттям.

Для стрижневого анкера з різбою клейовий шар складається з порожнистого циліндра, який служить буфером між анкерним стержнем і поверхнею отвору, просвердленого в бетонному блоці, як показано на рисунку 4.5. Ця товщина заповнює простір між бетоном і сталлю. Геометрія клейового

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						51
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

шару для анкера арматурного стержня, показаного на рисунок 4.6, є більш складною; за рахунок вушок з основи порожнистого циліндра видалено перфорацію, яка відповідає формі та малюнку вушок. Це гарантувало, що клейовий шар повністю обволікає анкер арматурного стержня без випадкового перекриття вузлів або елементів.

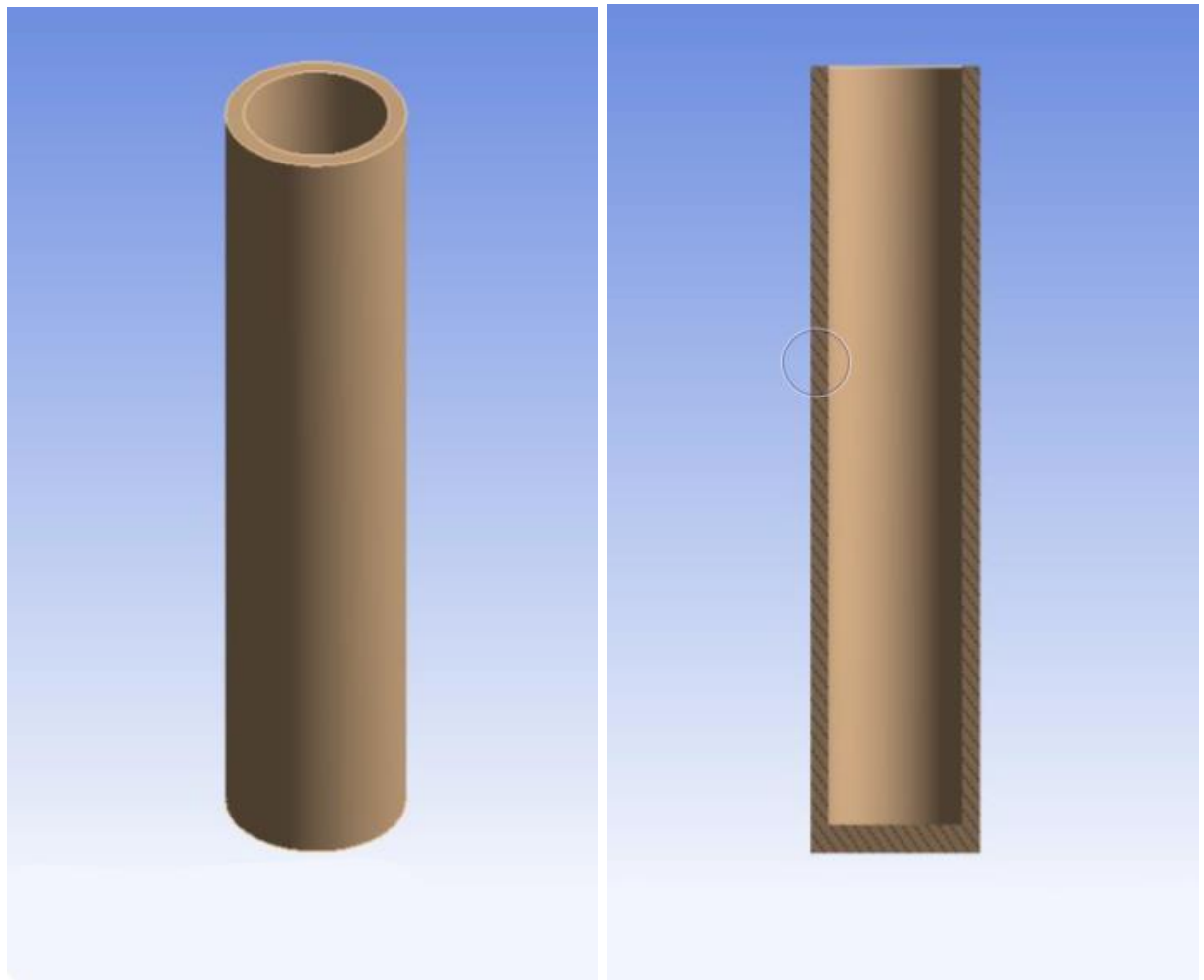


Рис. 4.5 Геометрія клейового шару стержня з різьбою (ліворуч). Розріз секції (праворуч)

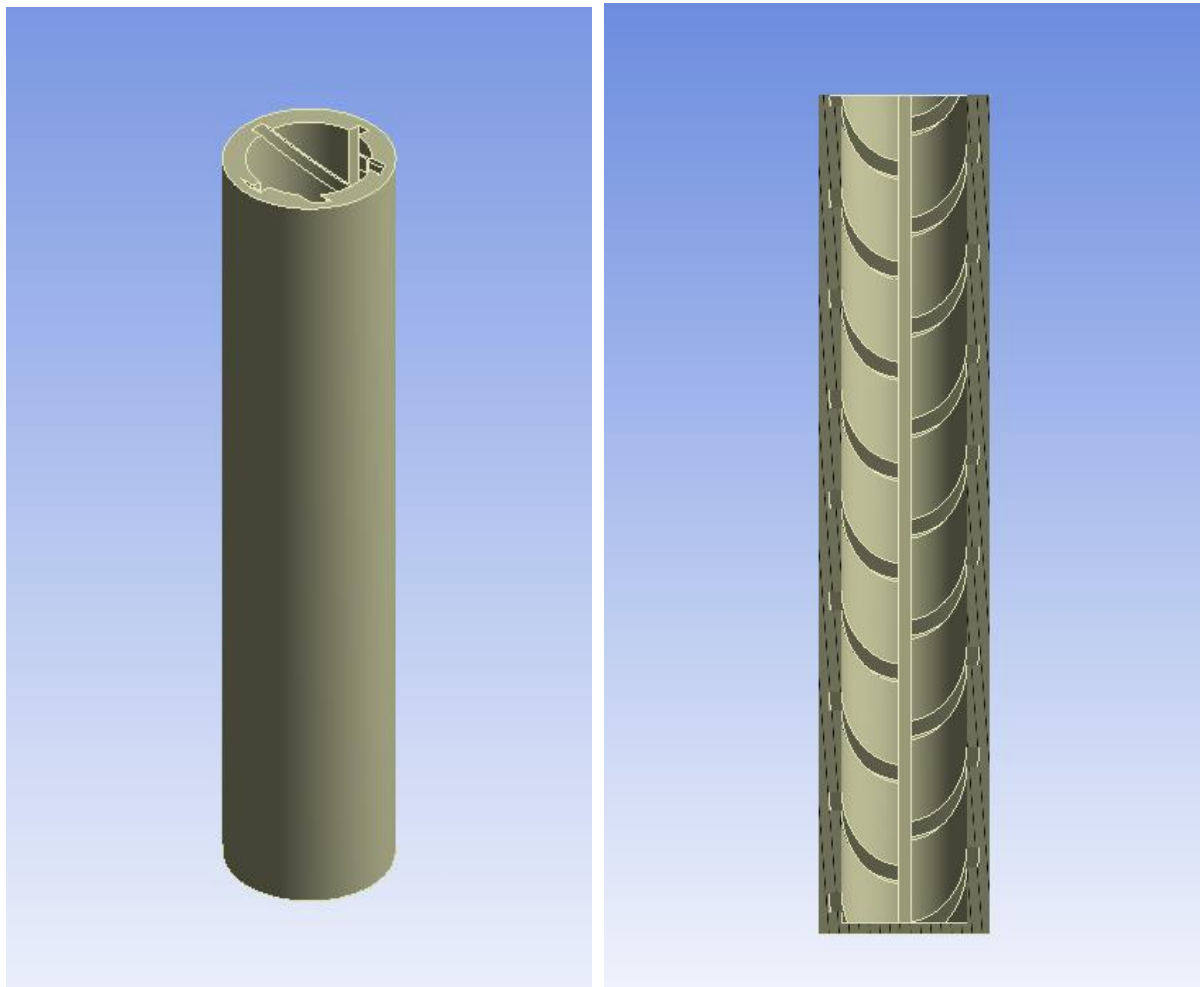


Рис. 4.6 Геометрія клейового шару арматури (ліворуч). Розріз секції (праворуч)

Кожен компонент геометрії використовує елементи SOLID 185 з 8 вузлами та 3 ступенями свободи, що забезпечує пластичність, гіперпружність, великі прогини та великі деформації. Щоб оптимізувати час виконання моделювання, кожному компоненту було призначено різний розмір елемента, при цьому сталевій обмежувальній пластині було призначено найбільші елементи, а клейовому шару – найменший.

У всіх версіях моделі сітка бетонного блоку складається з чотиригранників, як показано на рисунку 4.7. Розмір елемента було встановлено на 1,3 см, що призвело до загальної кількості 13 122 елементів, і не було додатково уточнено через незначну різницю в поведінці бетону між більш грубим і дрібним розміром сітки.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						53
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

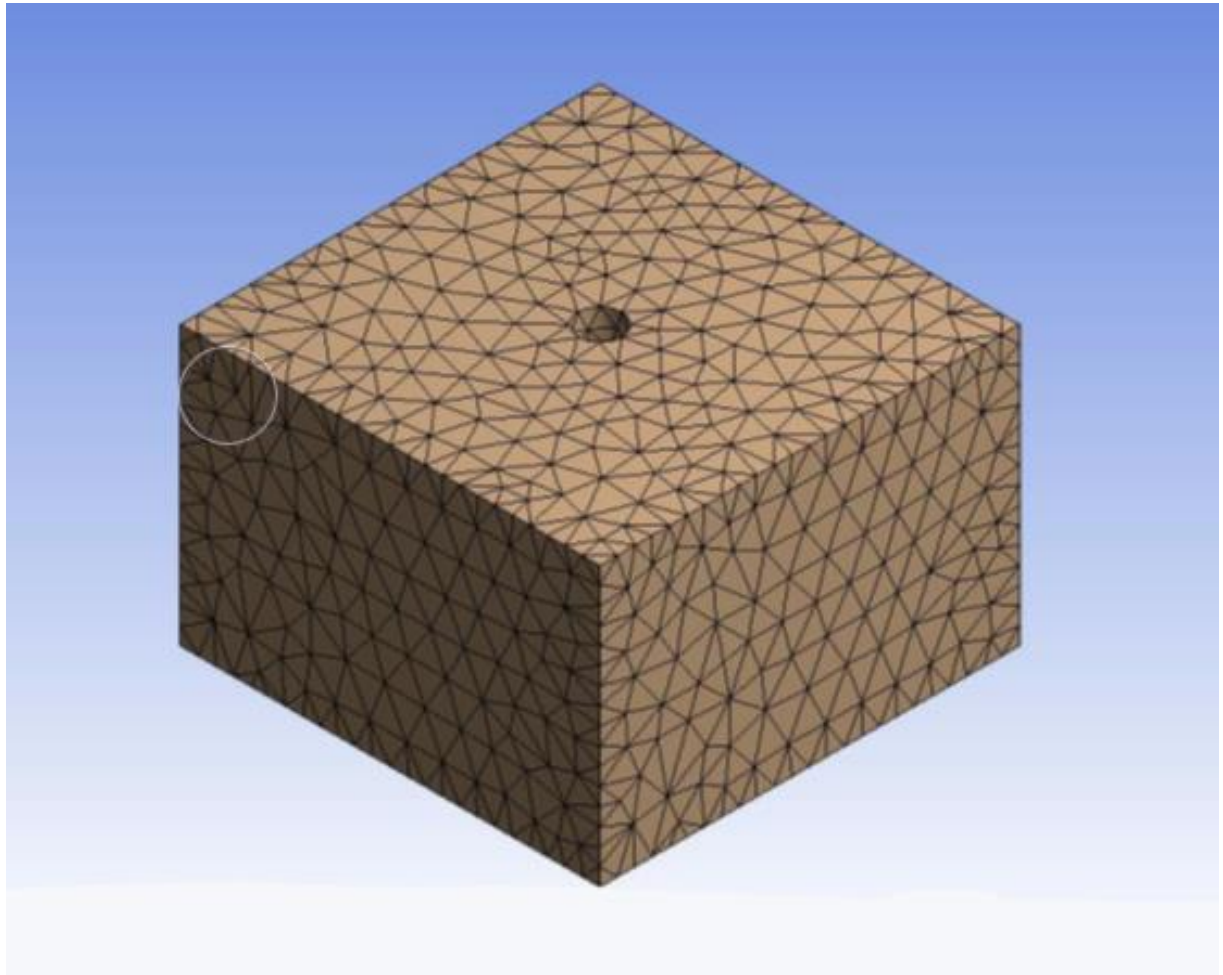


Рис. 4.7 Бетонна сітка

Різьбовий стержень і анкери арматурних стрижнів мають більш тонку сітку, ніж бетон, завдяки їх безпосередній участі в сприйнятті сили розтягу та розподілі напружень в епоксидному клейовому матеріалі, як показано на рисунку 4.8.

В обох випадках використовувалися тетраедри. Розміри елементів для кожного анкера були обрані та скориговані на основі двох умов: що подальше уточнення сітки призведе лише до незначної різниці в поведінці сталі, і що кількість елементів у кожному анкері була відносно еквівалентною, щоб бути порівнянними. Для моделі *РС* - з *КП* було призначено розмір елемента 2,5 мм, що дало 13 723 вузли та 3 756 елементів, тоді як розмір елемента 5 мм було призначено для арматурного стрижня, що призвело до 7 315 вузлів та 3 802 елементів.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						54
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

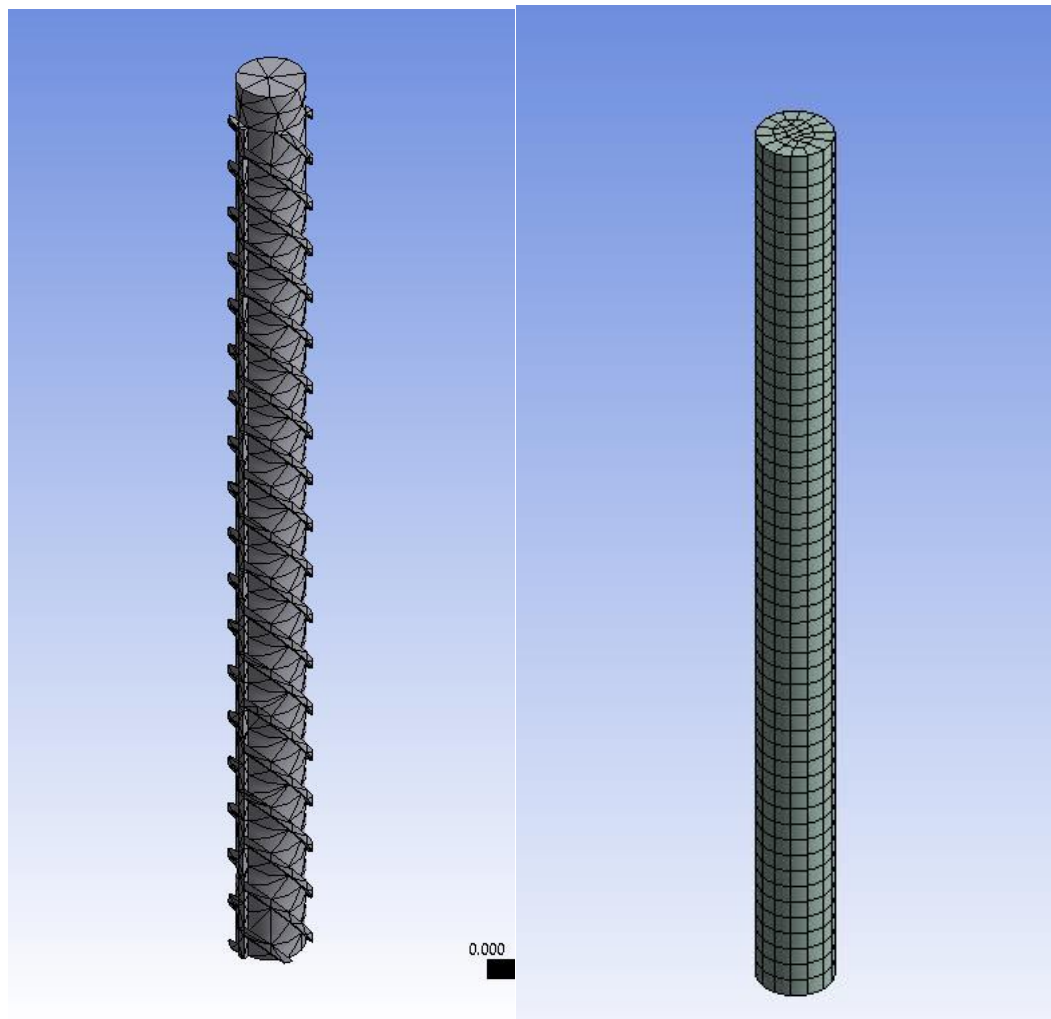


Рис. 4.8 Арматурна сітка (зліва) і сітка з різьбових стержнів (справа)

Сітка клейового шару, показана на рисунку 4.9 для арматурного стержня та стержневих анкерів відповідно, складається з найдрібнішого розміру сітки в загальній моделі. Властивості матеріалу адгезиву, а також точки на межі між адгезивом/анкером і адгезивом/бетоном вимагали значно меншого розміру елемента для найточнішої імітації адгезиву та поведінки на їх межі. Розміри елементів коригувалися до тих пір, поки моделювання не показало еквівалентні результати напруження зсуву в межах 5% різниці, і поки кількість елементів у всіх версіях моделі не стала майже еквівалентною. Таблиця показує кінцеві розміри елементів, призначені для клейового шару в кожній моделі, а також наступну кількість елементів і вузлів.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		55

Розміри елементів клейового шару

<u>Модель</u>	<u>Розмір елемента</u> <u>(мм)</u>	<u>К-сть вузлів</u>	<u>К-сть елементів</u>
<i>РС - без КП</i>	0,03	63 642	11 811
<i>РС - з КП</i>	0,06	22 611	11 943
<i>АрС - без КП</i>	0,07	18,308	9,439
<i>АрС - з КП</i>	0,075	18,094	9,329

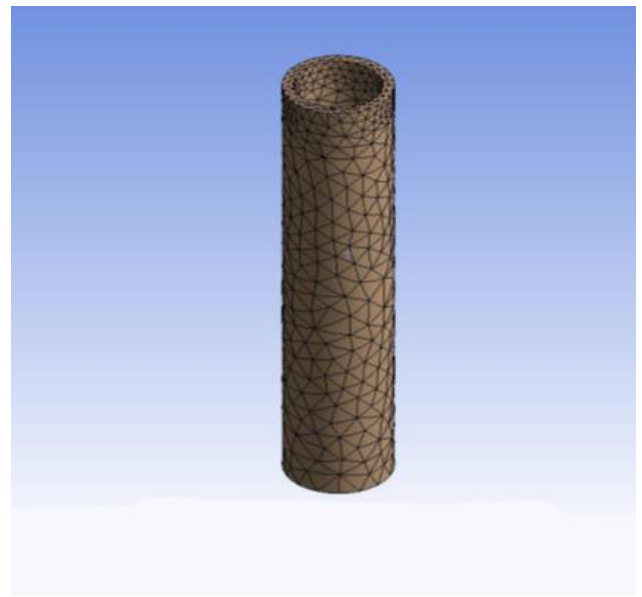
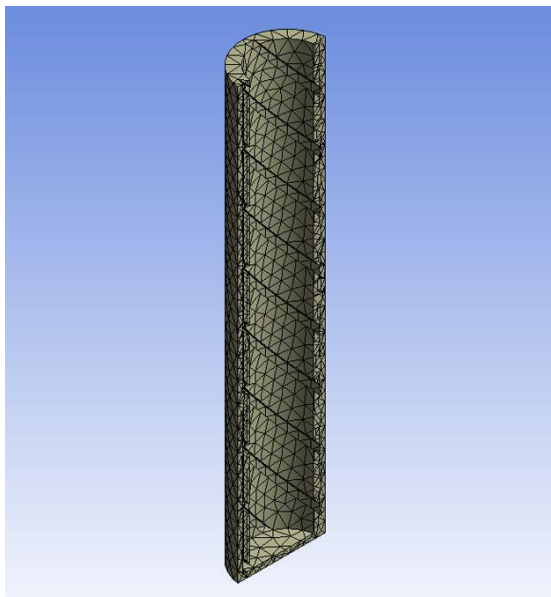


Рис. 4.9 Розріз сітки клейового шару арматурного анкера

4.3 Властивості матеріалу

Кожен компонент моделі використовував мультилінійну ізотропну модель зміцнення для імітації нелінійної поведінки матеріалу.

Властивості бетонного блоку засновані на бетоні з межею міцності 34,47 МПа, імітуючи властивості фізичних зразків. Змодельований бетон має густину 1,85 кг/м³. Спочатку вважалося, що властивості матеріалу для бетону за різних температур змінюються через зміну модуля пружності, але попередні випробування показали незначну різницю в поведінці системи. Тому було

прийнято, що властивості бетону залишаються незмінними при зміні температури.

Для експериментальних випробувань використовували високоміцні сталі з метою запобігання руйнуванню сталі в зразках. Властивості матеріалу стержневого анкера з різьбленням були засновані на властивостях сталі ASTM A354 Grade BD [13], щоб відповідати властивостям експериментального анкера, і їм було призначено номінальну межу текучості 896,32 МПа і граничну міцність 1034,21 МПа. Властивості матеріалу арматурного стержня були задані на властивостях сталі марки A1035 120 і, таким чином, отримали номінальну межу текучості 827,37 МПа і граничну міцність 1034,21 МПа. Значення пластичної деформації, визначені рівнянням (4.1), і значення напруження, визначені рівнянням (4.2), були розраховані на основі технічних кривих залежності напружень від деформації для кожного сорту сталі і враховувалися в багатолінійних ізотропних графіках, щоб дозволити змодельовати нелінійну поведінку.

$$\text{Пластична деформація} = \epsilon_{\text{true total}} - \left(\frac{\sigma_{\text{true}}}{E}\right) \quad (4.1)$$

$$\text{Напруження} = \sigma_{\text{eng}} \cdot (1 + \epsilon_{\text{eng}}) \quad (4.2)$$

Оскільки експериментальні арматурні анкери не були спочатку зі сталі класу 120, а натомість були піддані термічній обробці до межі текучості 827,37 МПа, можливі неточності при порівнянні властивостей матеріалу моделі з властивостями фактичного зразка. В експериментальних випробуваннях високоміцні сталі були спеціально використані для запобігання впливу сталевих дефектів, тому це не повинно впливати на результати моделі скінчених елементів. Властивості матеріалу для різних температур не розглядалися через припущення, що механічна поведінка сталі не зміниться в діапазоні температур від -18 °С до 49 °С. Результати комп'ютерного моделювання 7 зразків при різних температурах (рис. 4.10)

					MP 2119211 ПЗ	Аркуш
						57
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

показали, що мінімальна межа текучості знаходиться в межах 120 МПа, після чого з'єднання працює в пластичній стадії.

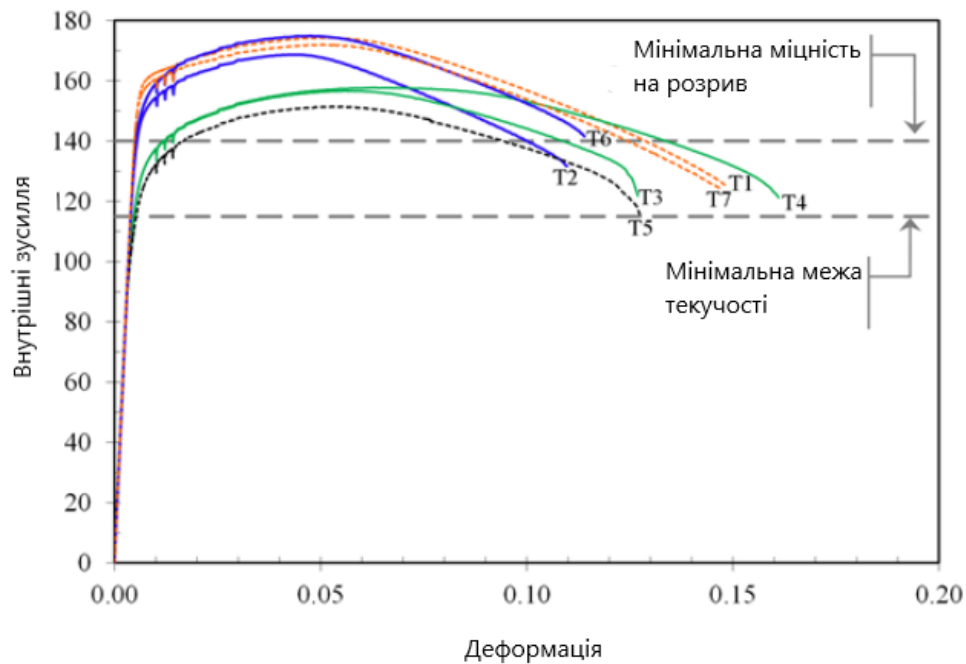


Рис. 4.10 Графік внутрішніх зусиль та деформації для сталі

При зміні температури навколишнього середовища поведінка клею змінюється. Таким чином, окремі властивості матеріалу були застосовані до клейового шару на основі поведінки клею під впливом температурних коливань. Значення напружень та загальної деформації епоксидної смоли, випробуваної при різних температурах, були екстрапольовані та перетворені в пластичну деформацію та напруження за допомогою рівнянь (4.1) і (4.2).

Результати згодом були зменшені, щоб узгодити з граничними напруженнями 41,37 МПа, та були введені в багатолінійну ізотропну модель затвердіння для забезпечення нелінійного аналізу адгезиву. Коефіцієнт Пуассона 0,40 застосовувався при зміні поперечних розмірів клею при деформації на розтяг. Модуль Юнга для клею, змінювався в залежності від температурних умов, значення якого наведено в таблиці 4.2.

Результати моделювання для клею показали, що найбільші максимальні напруження отримуються при температурі 25 °C (58 МПа); під дією більш

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						58
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

високих температур клей швидше переходить у пластичну стадію (41.35 МПа при 40 °С), а при дії екстремально низьких температур втрачає свої міцнісні характеристики (7.25 МПа при -40 °С). Графік, що показує роботу клею в пружній і пластичній стадії при температурі 25 °С показаний на рисунку 4.11.

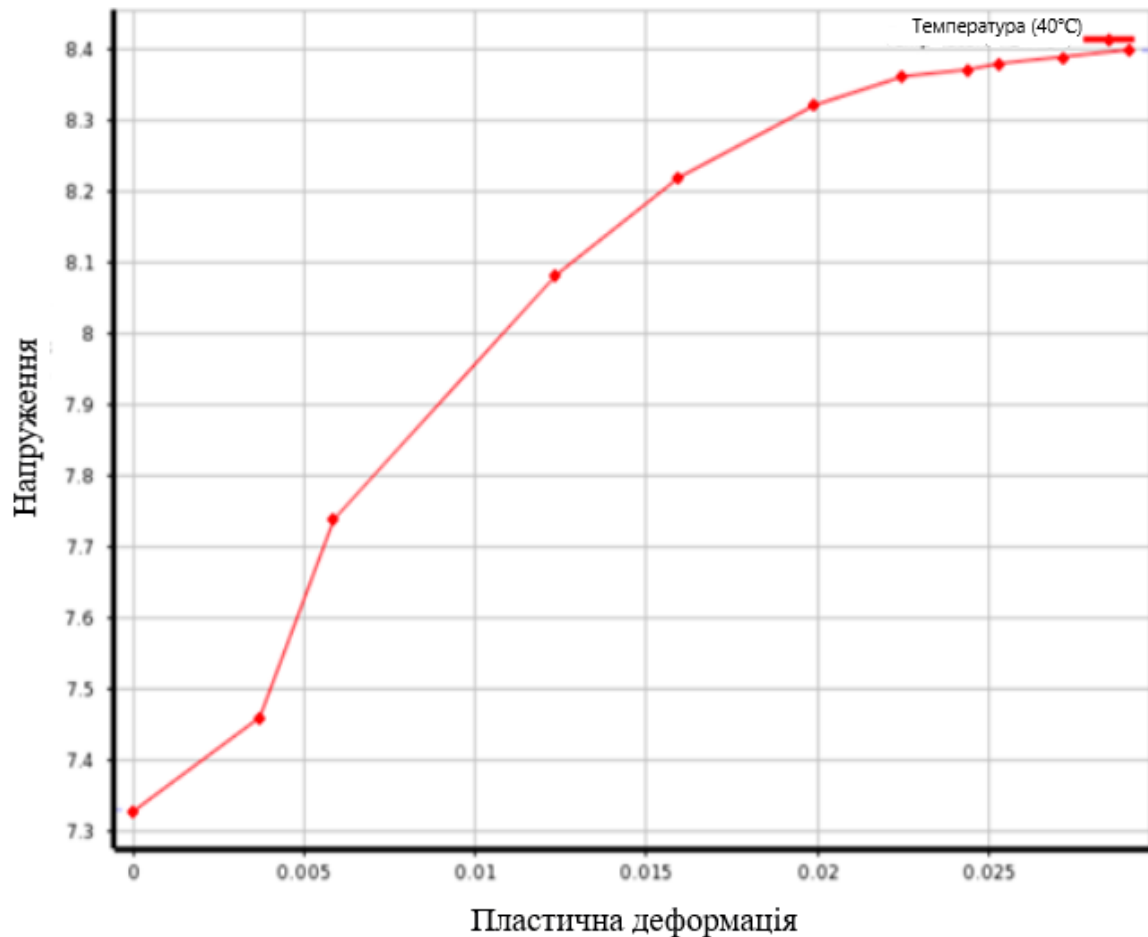


Рис. 4.11 Пластична деформація та напруження клею при 25 °С

Таблиця 4.2

Модуль Юнга для клею при різних температурах

ТЕМПЕРАТУРА	МОДУЛЬ ЮНГА
-40°С	4200,29 МПа
25°С	2464,88 МПа
40 °С	689,48 МПа

4.4 Контактні умови

Умови контакту, встановлені програмою ANSYS, в основному використовувалися для аналізу. Це призвело до умов зв'язаного контакту як на межі сталь/клей, так і на межі клей/бетон. У моделях без дна, покритого клеєм, контакт було видалено вручну на межі між нижньою частиною сталевго анкера та дном бетонного отвору, щоб переконатися, що анкер не був безпосередньо прикріплений до бетону.

Поверх бетонного блоку була встановлена сталева пластина товщиною 1,91 см. З центроїда сталевго пластини було видалено отвір діаметром 2,54 см, що дозволяло анкеру виступати крізь пластину за необхідності. Потім до нижньої частини сталевго пластини було застосовано нерухому обмежувальну опору, показану на рисунку 4.12, яка, у свою чергу, закріпила бетонний блок на місці та заборонила переміщення та обертання в напрямках X, Y та Z. Сама сталева пластина відповідає тій пластині, яка обмежує експериментальний бетонний зразок. Всі інші поверхні залишаються без обмежень.

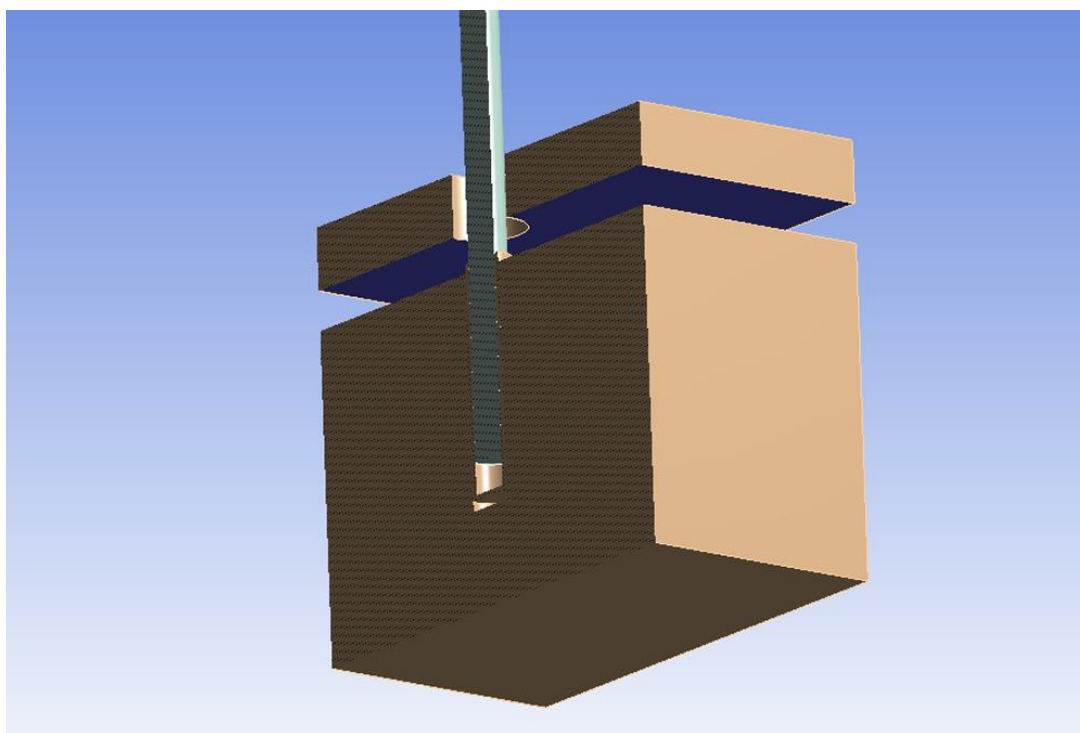


Рис. 4.12 Розріз секції, що показує фіксовану опору під обмежувальною пластиною

4.5 Прикладена сила

До верхньої поверхні анкерного стрижня було застосовано наростаюче розтягувальне зусилля, щоб імітувати фізичні умови випробувань, як показано на рисунку 4.13.

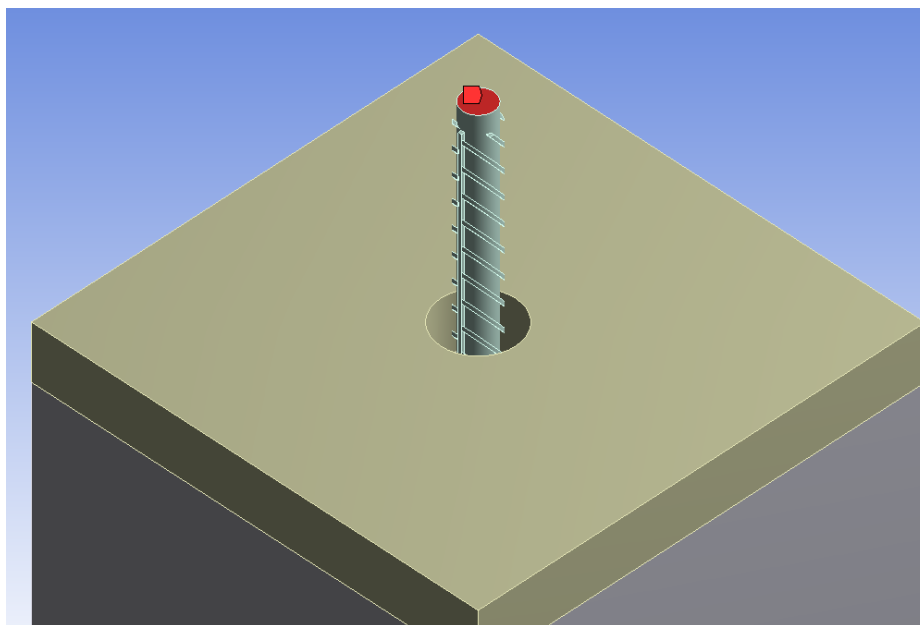


Рис. 4.13 Сила, прикладена до верхньої поверхні анкерного стержня

4.6 Процедура аналізу

Нелінійний аналіз скінченних моделей був реалізований шляхом впровадження багатолінійних ізотропних моделей зміцнення матеріалів до відповідних компонентів. Значення пластичної деформації та напруження бетону, стрижня з різьбленням [13] і арматурного стрижня класу 120 A1035 було введено в модуль інженерних даних для ANSYS Workbench 18.2. Виявлено, що вплив температури на модуль бетону не змінює поведінку загальної моделі. Очікується, що температура також матиме незначний вплив на поведінку сталі.

Таким чином, нелінійні моделі матеріалу для бетонного елемента, різьбового стрижня, арматурного стрижня та сталевий обмежувальної пластини залишалися незмінними протягом змін температури.

					MP 2119211 ПЗ	Аркуш
						61
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Попереднє дослідження нелінійного аналізу з використанням моделі білінійного еластичного ідеально пластичного матеріалу також було проведено для клейового шару.

Усім версіям моделі було призначено 60 кроків навантаження по 2 секунди. Це моделювало процедуру випробування [6], у якій навантаження прикладається до анкера з постійною швидкістю навантаження протягом двох хвилин. Було призначено 10 початкових підкроків з мінімальним підкроком 1 і максимальним 50, щоб гарантувати безперебійність нелінійних обчислень. Однак, оскільки ефекти швидкості навантаження не були включені, зрештою приріст часу, призначений крокам навантаження, не вплинув на результати.

4.7 Висновки з розділу

1. Комп'ютерне моделювання роботи вклеєних анкерів виконується методом скінченних елементів у середовищі програмного комплексу ANSYS 18.2, який дозволяє досить точно представити зразки, використані для експериментальних досліджень та описані в розділах 2 і 3.

2. Структура, розміри та кількість скінченних елементів обрані таким чином, щоб можна було отримати близькі та досить точні результати для анкерів з різьбою та анкерів у формі арматури періодичного профілю. В обох випадках для моделювання клейового шару використані найбільш дрібні скінченні елементи, а для моделювання бетону – більш крупні.

3. Характеристики міцності та пружності сталі й бетону прийняті рівними відповідним характеристикам матеріалів, використаних при експериментальних дослідженнях зразків, описаних в розділах 2 і 3.

4. Умови обпирання та прикладення зовнішньої сили змодельовані ідентичними до умов виконаних експериментальних випробувань, методика яких була описана в розділі 3.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						62
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Розділ 5

РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

5.1 Результати моделювання методом скінченних елементів

У процесі моделювання було розроблено та проаналізовано чотири типи моделей скінченних елементів: дві моделі різьбових стрижнів і дві моделі арматурного стрижня. Кожна модель поділяється на підкатегорії залежно від того, чи міститься шар клею на дні отвору, а потім додатково розподіляється на підкатегорії щодо коливань температури, для яких змінюються властивості матеріалу клею. Переміщення вимірюється від вибраного вузла в анкері на 0,64 см над поверхнею сталеві обмежувальної пластини, яка повторює розташування датчиків зміщення на фізичних зразках. Моделі проєктувалися згідно вимог захисту від корозії [14], бетон задавався відповідно до [15]. Зведення результатів наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

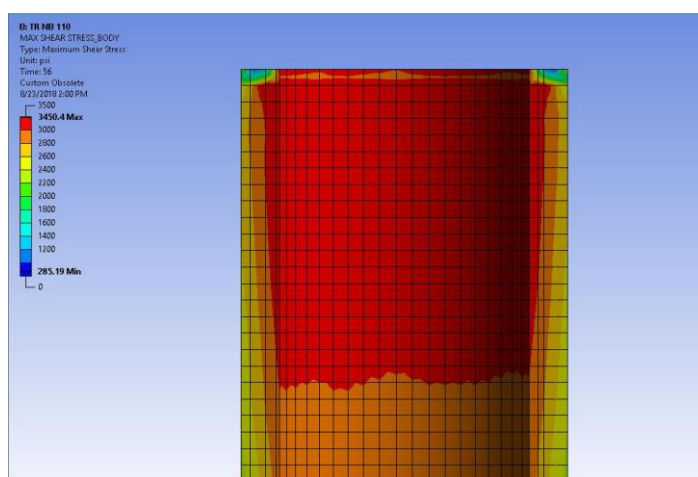
Підсумок результатів моделювання методом скінченних елементів

<u>Модель</u>	<u>Температура(°C)</u>	<u>Навантаження(кН)</u>	<u>Переміщення(см)</u>
<i>РС - без КП</i>	25	97.2	0,05
	40	78.4	0,1
<i>РС - з КП</i>	25	112.2	0,02
	40	85.88	0,07
<i>АрС - без КП</i>	25	105.28	0,07
	40	78.68	0,07
<i>АрС - з КП</i>	40	91.48	0,07

5.2 Різьбовий стержень без клейового покриття дна отвору

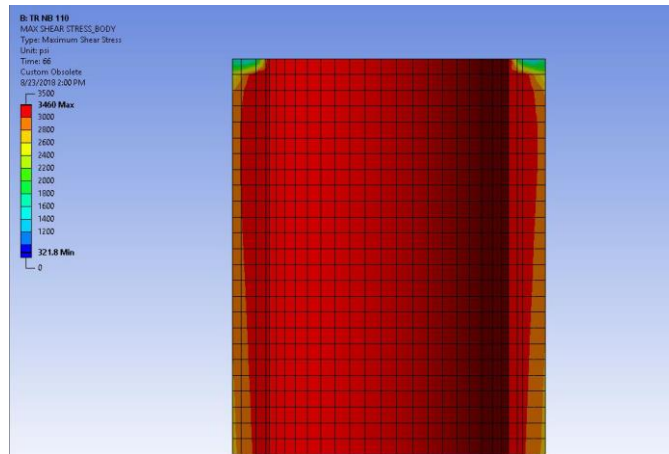
При застосуванні сили розтягу до моделі *РС - без КП* із передбачуваними адгезивними властивостями при 40 °С, адгезивний шар досягає максимального напруження зсуву 23,88 МПа та максимального еквівалентного напруження 41,37 МПа, останнє з яких відповідає граничній напрузі адгезиву при 40 °С, що визначається кривою напруження-деформація. Напруження зсуву визначається як сила на одиницю площі, що діє паралельно поверхні отвору, і відноситься до зсуву між анкерним стержнем, клеєм і бетоном.

Подальший аналіз результатів показав, що з плином часу та збільшенням навантаження клей досягає максимального напруження зсуву спочатку на межі сталь/клей, а потім поширюється по довжині клею на зовнішню поверхню, або на межу бетон/клей, як показано на рис. 5.1 (а, б, в). З цієї поведінки робимо висновок, що руйнування клейового шару відбувається в точці, в якій пікове напруження зсуву адгезиву рівномірно розподіляється вздовж внутрішньої поверхні та проникає крізь клейовий шар на зовнішню поверхню.

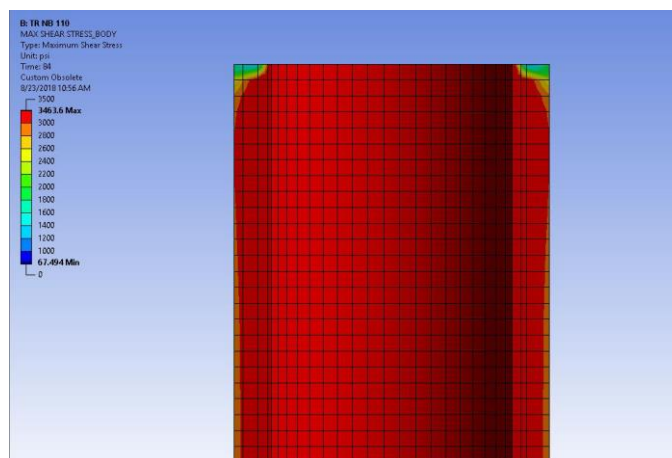


(a)

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						64
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		



(б)



(в)

Рис. 5.1 (а, б, в). Розподіл напружень зсуву клейового шару в момент часу 53 кН (а), 62 кН (б) і 80 кН (в)

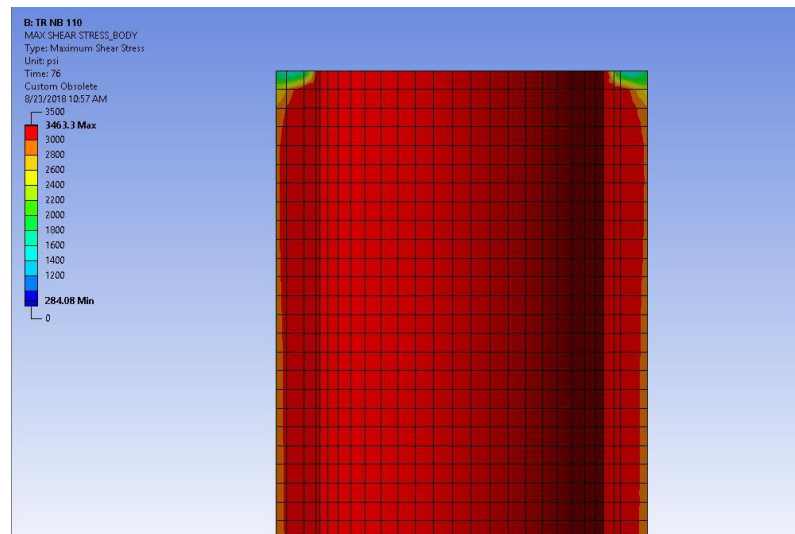
Виходячи з визначеного критерію руйнування, було виявлено, що модель *РС* - без *КП* із передбачуваними властивостями адгезії при 40 °С руйнується при 77,67 кН. Прогресія напруження зсуву на контурному графіку для кроку в часі до руйнування, при руйнуванні та після руйнування показано на рис. 5.2 (а, б, в). На рисунку 5.3 показано ізометричний розріз моделі *РС* - без *КП* при руйнуванні, на якому на зовнішній поверхні клейового шару видно плями пікового напруження зсуву. На рисунку 5.4 показано контурний графік еквівалентного напруження. На рисунку 5.5 показаний контурний графік нормального напруження в напрямку *Y* або сили на одиницю площі, що діє

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						65
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

перпендикулярно до нанесеної поверхні, у клеї під навантаженням на руйнування.

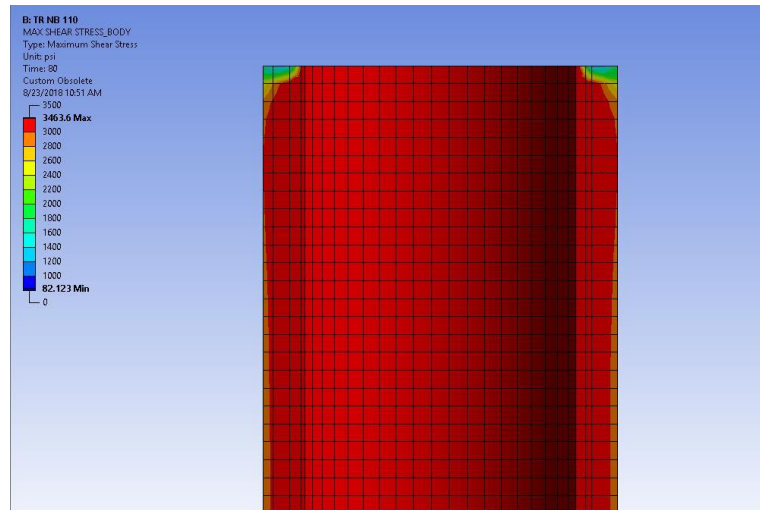
Спостерігалось зміщення на 1 мм у анкерному вузлі. Це збігається зі зразками для фізичних випробувань матеріалу №3, випробуваними при температурі від 43 °С до 49 °С, для яких було визначено 81,54 кН і руйнування при зміщенні 1,02 мм. На рис. 5.6 наведені залежності навантаження від переміщення для матеріалу №3 у порівнянні з залежностями навантаження від переміщення, *РС - без КП* при 40 °С, а також точку, в якій передбачається збій у моделі *РС - без КП*. Ця точка збігається з результатами фізичних випробувань матеріалу №3.

Крім того, коли навантаження зменшується до 80%, 60% і 40%, розподіл напруження зсуву по діаметру отвору різко зменшується від поверхні до дна отвору. При 100% розподіл напружень є постійним, що вказує на те, що клей має рівномірний розподіл напружень вздовж зовнішньої поверхні.

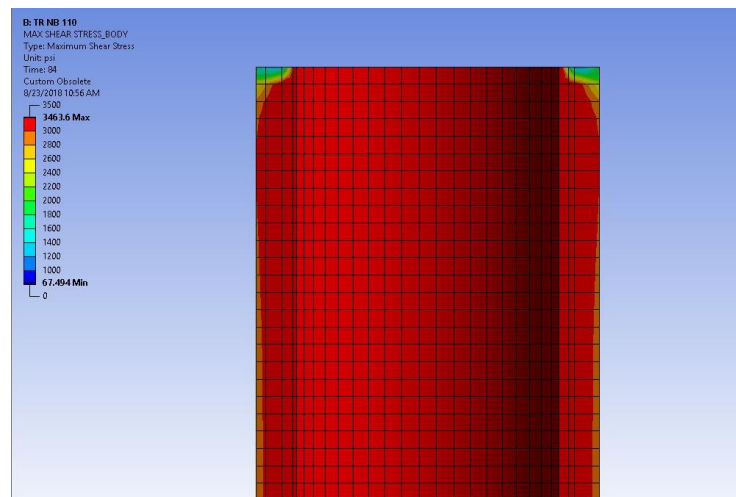


(a)

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						66
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		



(б)



(в)

Рис 5.2 (а, б, в). Контурний графік напружень зсуву клейового шару моделі РС - без КП при 40 °С до руйнування (а), при руйнуванні (б) і після руйнування (в) у міру збільшення навантаження.

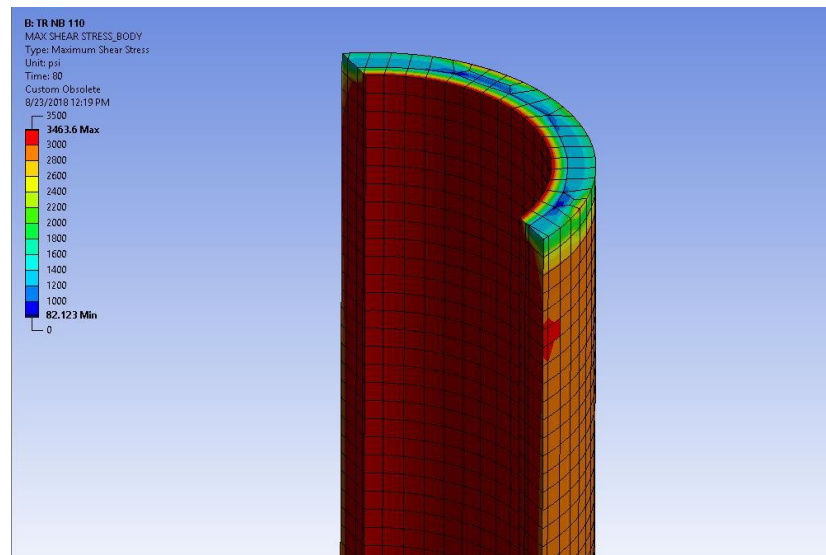


Рис. 5.3 Зріз клейового шару моделі *PC* - без *KП* при 40 °С

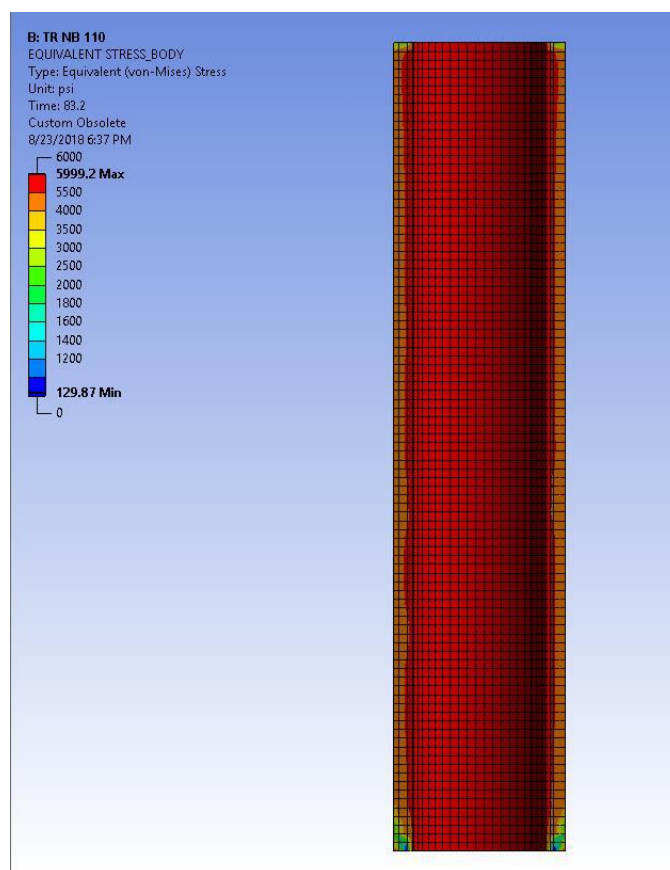


Рис. 5.4 Контурний графік еквівалентного напруження в клейовому шарі при 40 °С при руйнуванні

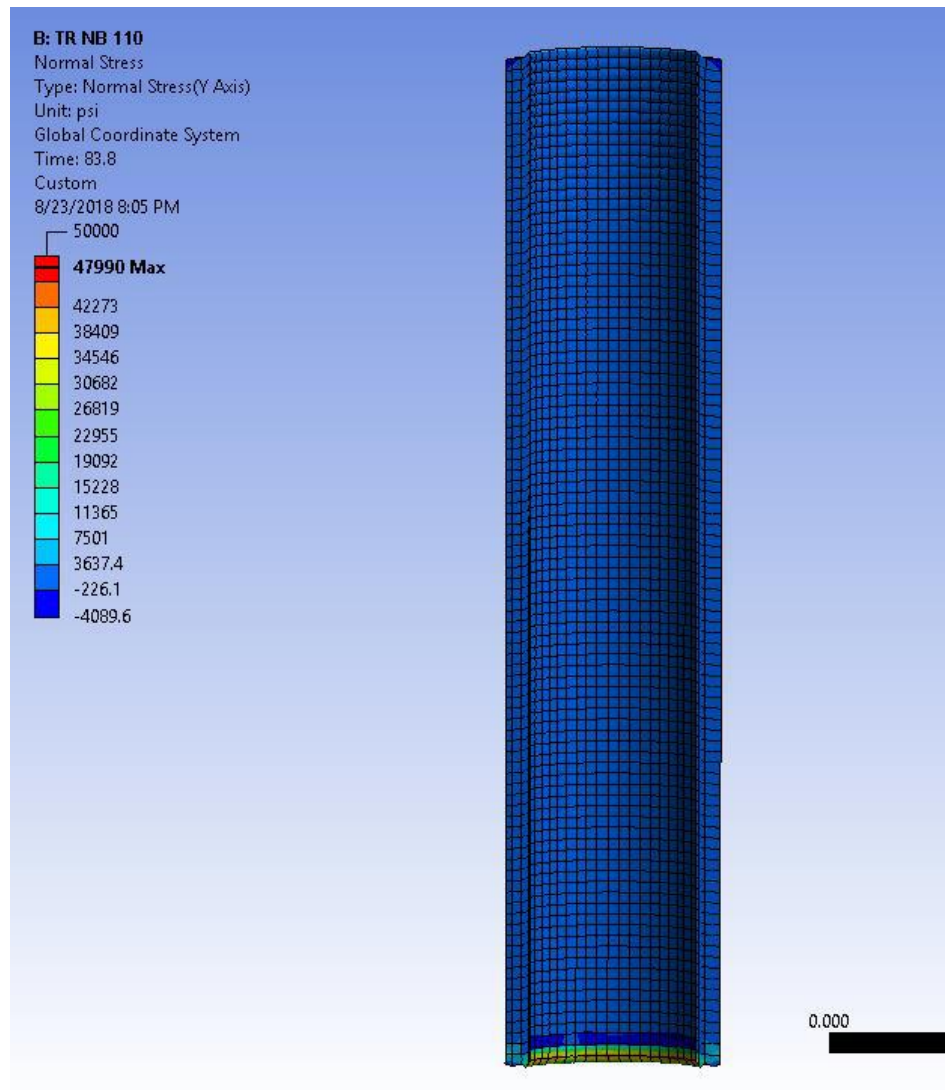


Рис. 5.5 Контурний графік нормального вертикального напруження в
 клейовому шарі при 40 °С при руйнуванні

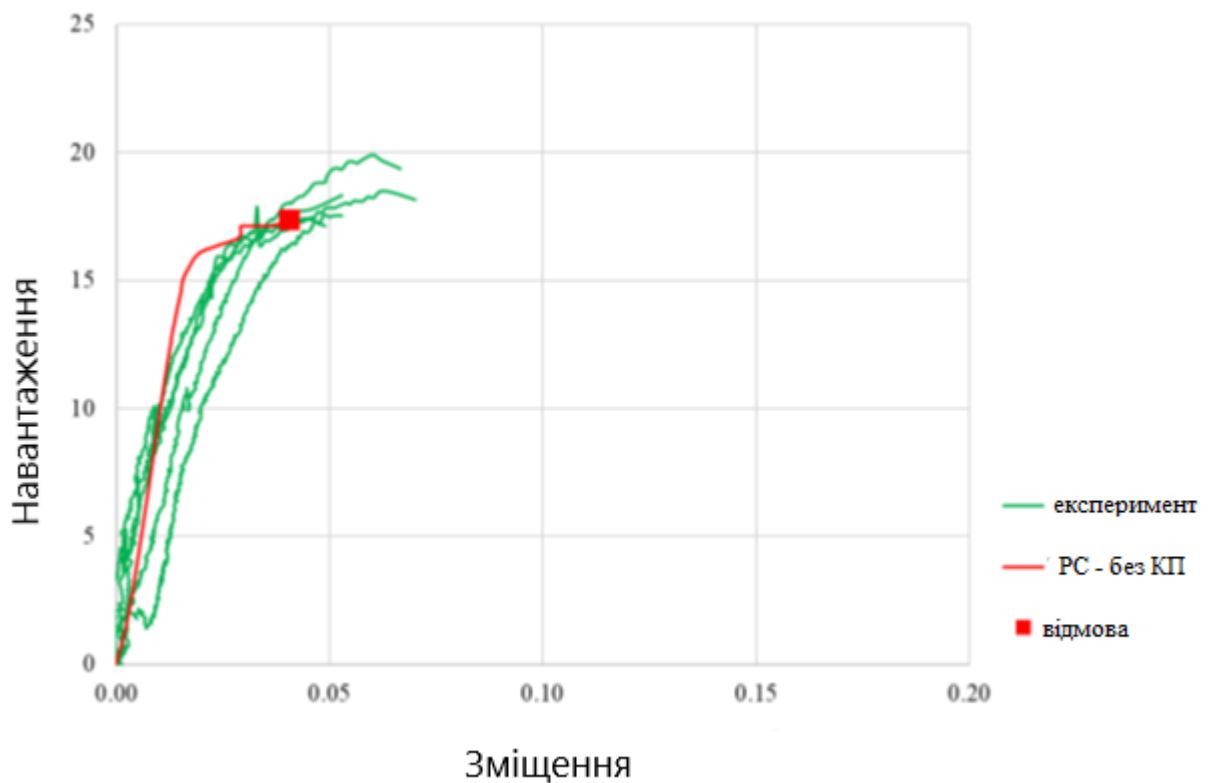


Рис. 5.6 Результати для стрижня з різьбою та результати моделі *PC - без КП* із властивостями клейового матеріалу при 40 °С (Матеріал 2)

Після застосування розтягувальної сили до моделі *PC - без КП* із передбачуваними властивостями адгезивного матеріалу при 25 °С максимальне напруження зсуву в адгезиві становило 33,44 МПа, а максимальне еквівалентне напруження становило 57,92 МПа, що збігається з властивості матеріалу. Клей руйнується при 96,39 кН із зміщенням 0,58 мм. Контурна діаграма напружень при руйнування показана на рисунку 5.7.

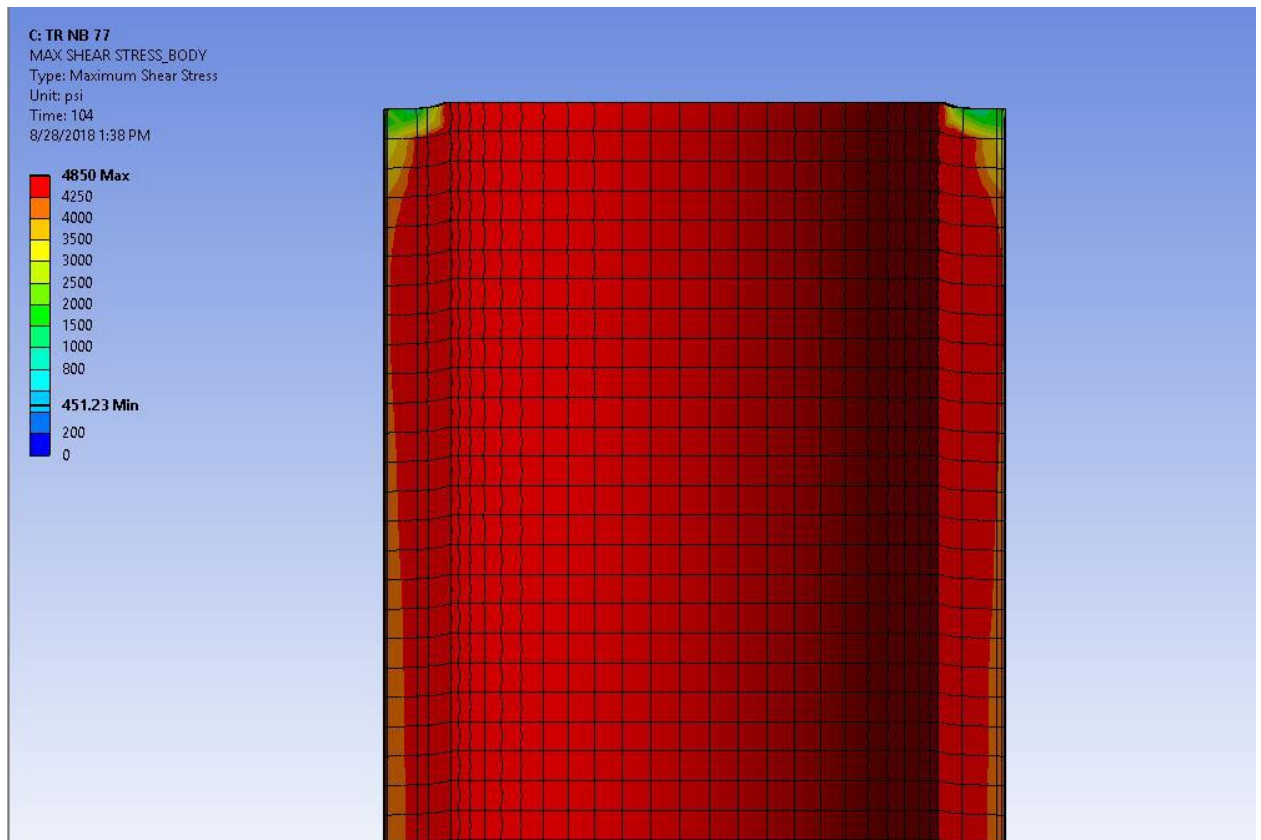


Рис. 5.7 Контурний графік напружень зсуву клейового шару моделі *РС* - без *КП* при 25 °С при руйнуванні

Модель *РС* - без *КП* із припущеними властивостями клейового матеріалу при -40 °С дає максимальне напруження зсуву 42 МПа та максимальне еквівалентне напруження 72,62 МПа для адгезиву, що відповідає властивостям матеріалу. Однак у цій моделі не вдалося спостерігати пошкодження клею на основі визначених критеріїв відмови, оскільки розподіл напружень зсуву не поширювався на всю довжину клею до того, як сталевий анкер продемонстрував пошкодження, що робило систему нерозв'язною під подальшим навантаженням. Це означає, що клей виходить за межі, що збігається з властивостями клейового матеріалу при різних температурах, при яких у клеях спостерігається збільшення міцності на 25% при зниженні температури від 25 °С до -40 °С. У фізичних випробуваннях матеріал №3 вийшов з ладу при на 18% вищій навантажувальній здатності, коли температура випробування знизилася з 43 °С до 49 °С до -18 °С, дотримуючись

аналогічної тенденції, тоді як матеріал №1 зазнав руйнування сталі в 50% випробувань при низькій температурі.

5.3 Різьбовий стержень з клейовим покриттям дна отвору

Після прикладення сили розтягування до моделі *РС* - з *КП* із передбачуваними властивостями клейового матеріалу при 40 °С спостерігалось руйнування клейового шару при силі 185,27 кН. Було визначено максимальне напруження зсуву 23,87 МПа та максимальне еквівалентне напруження 41,35 МПа, а в цій точці спостерігається зміщення у анкерному вузлі на 0,76 мм. Графік напружень при руйнуванні показано на рисунку 5.8. У порівнянні з моделлю *РС* - без *КП* при 40 °С, модель *РС* - з *КП* демонструє на 10% більшу міцність відповідно до критерію відмови. Це означає, що додатковий шар клею в нижній частині отвору сприяє подальшому розподілу напружень в тілі клею, дозволяючи клею сприймати більше навантаження.

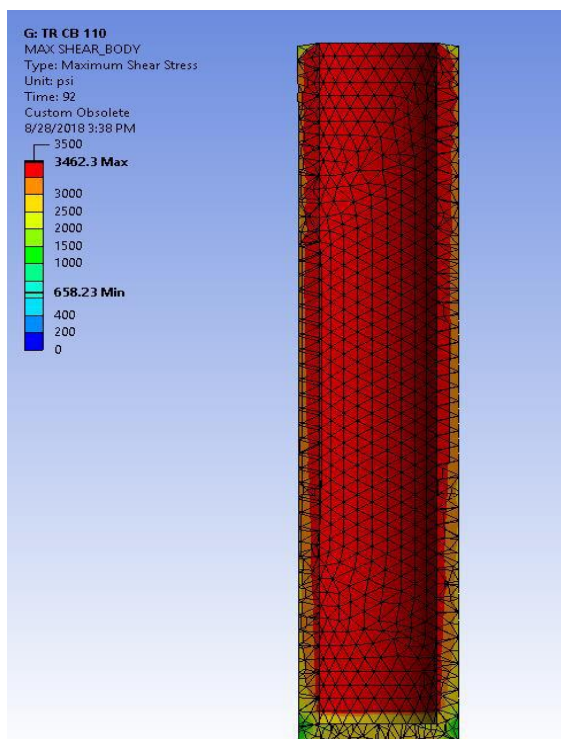


Рис. 5.8 Контурний графік напружень зсуву клейового шару моделі *РС* - з *КП* при 40 °С при руйнуванні

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						72
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

При 25 °С руйнування відбувається при 11,21 кН, що на 20% більше, ніж у моделі *РС - без КП*. Було встановлено, що максимальні напруження зсуву та максимальні еквівалентні напруження в цій точці становили 33 МПа та 57 МПа відповідно, а спостережене зміщення становило 0,25 мм. Графік напружень під час руйнування показано на рисунку 5.9.

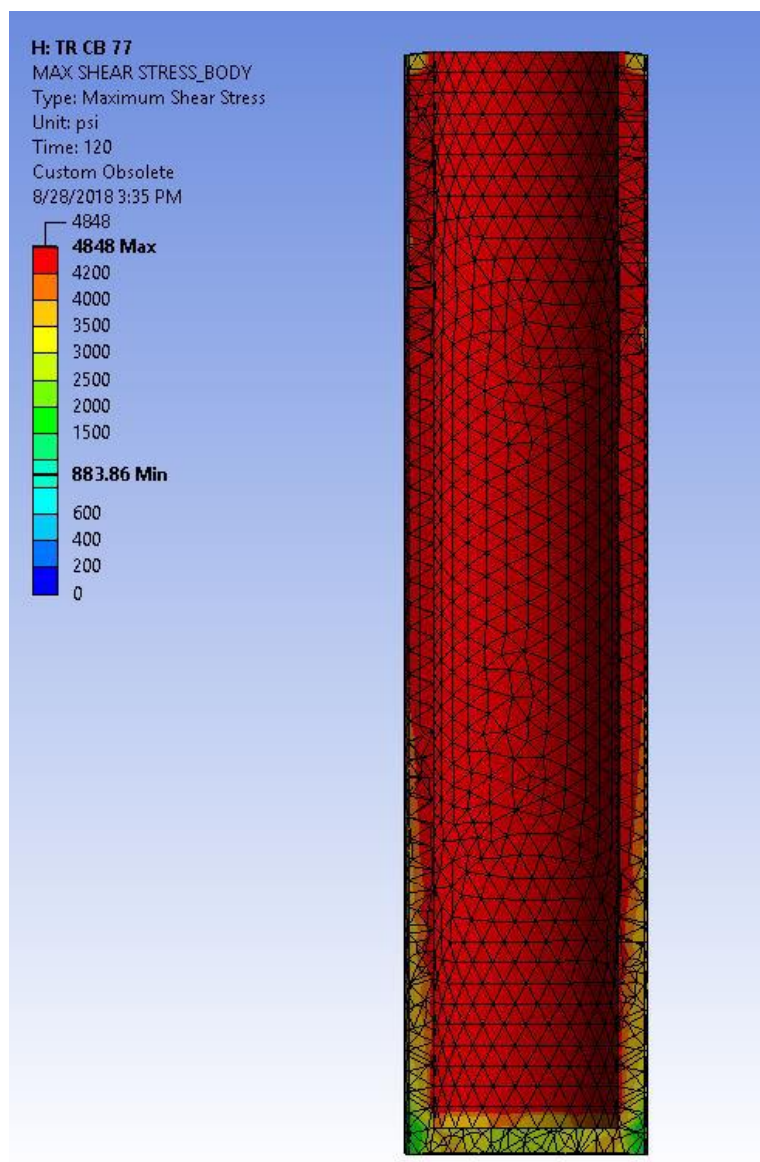


Рис. 5.9 Контурний графік напружень зсуву клейового шару моделі *РС - з КП* при 25 °С під час руйнування

При 40 °С модель *РС - з КП* досягає максимальних напружень зсуву та максимальних еквівалентних напружень 42 МПа та 73 МПа відповідно. Подібно до моделі *РС - без КП*, руйнування не можна спостерігати на основі

визначених критеріїв руйнування через руйнування анкера до того, як пікове напруження зможе рівномірно розподілитися вздовж внутрішньої поверхні клею. Випробування на висмикування матеріалу №1 відображають це тим, що руйнування сталі відбулося до руйнування клею в 50% випробувань при низькій температурі.

5.4 Арматурний стержень без клейового покриття дна отвору

Результати аналізу скінчено-елементної моделі арматурного стержня показують значну зміну розподілу напружень зсуву порівняно з результатами стрижня з різьбою. У той час як моделі з різьбовими стержнями демонструють найвищі напруження зсуву спочатку на межі сталь/клей, яка поступово поширюється по довжині клею, а також убік до межі клею/бетону, моделі з арматурним стержнем демонструють найвищі напруження зсуву спочатку поряд із поверхнею клей/бетон та навколо вушок арматурного стержня, перш ніж поступово розподілити решту клею.

Зусилля, прикладене до анкера, передається через вушка на клей, створюючи зони високого напруження на краю вушок і кишені з низьким напруженням між вушками. Це можна побачити на рисунку 5.10.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						74
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

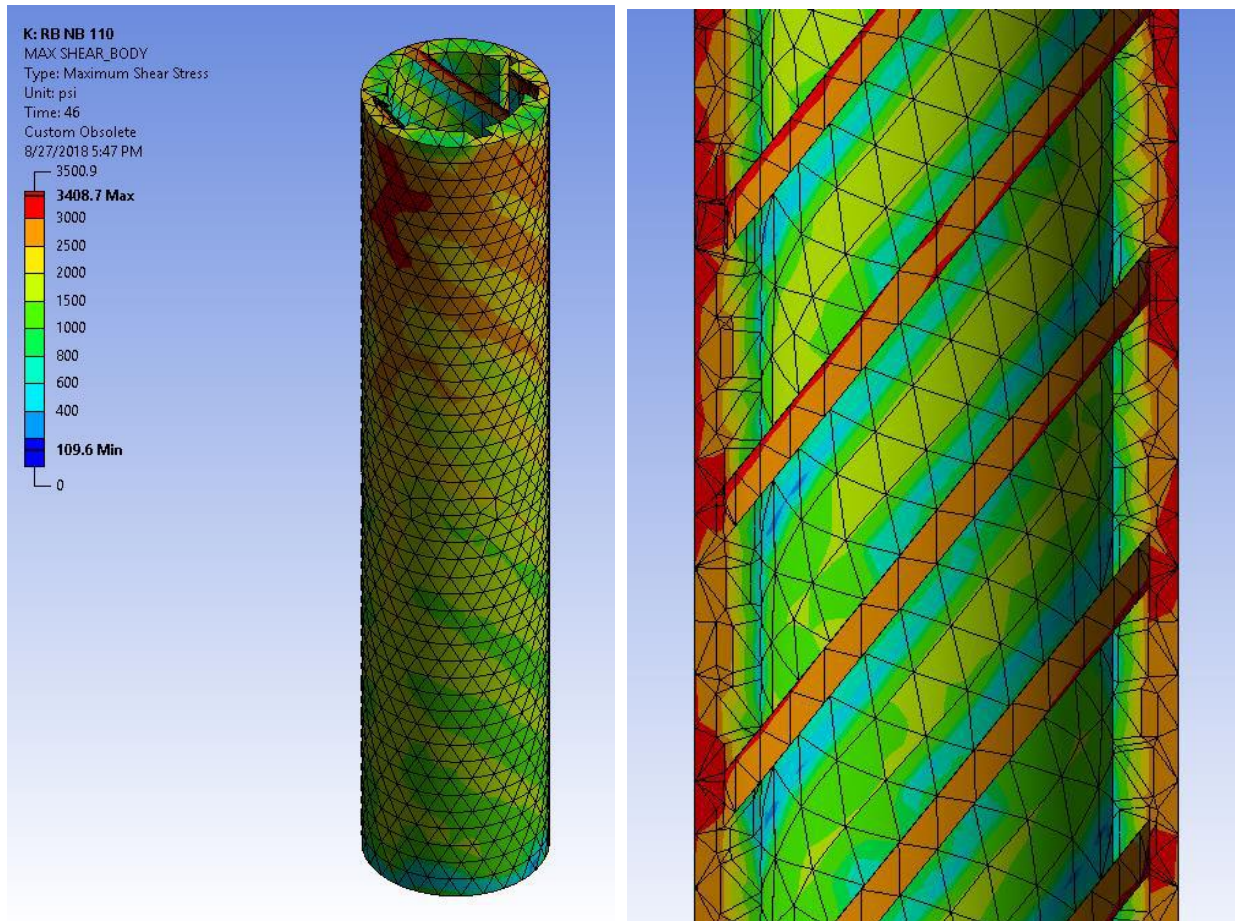


Рис. 5.10 Схема напружень зсуву, яка повторює форму наконечників арматурного стержня (ліворуч), а також зони високого напруження на наконечниках і низького напруження між наконечниками (праворуч)

Через відмінності в поведінці, для моделей арматурного стержня були внесені коригування критерію руйнування. Було виявлено, що зі збільшенням прикладеного навантаження високе напруження зсуву на межі клею/бетону в кінцевому підсумку поширюватиметься по всій довжині клею, як показано на рисунку 5.11, і створюватиме послідовний шаблонний розподіл напружень на внутрішній поверхні. З цього спостереження було зроблено припущення, що руйнування відбувається в моделях арматурних стрижнів у точці, в якій пік напружень в адгезиві послідовно розподіляється по зовнішній поверхні шару.

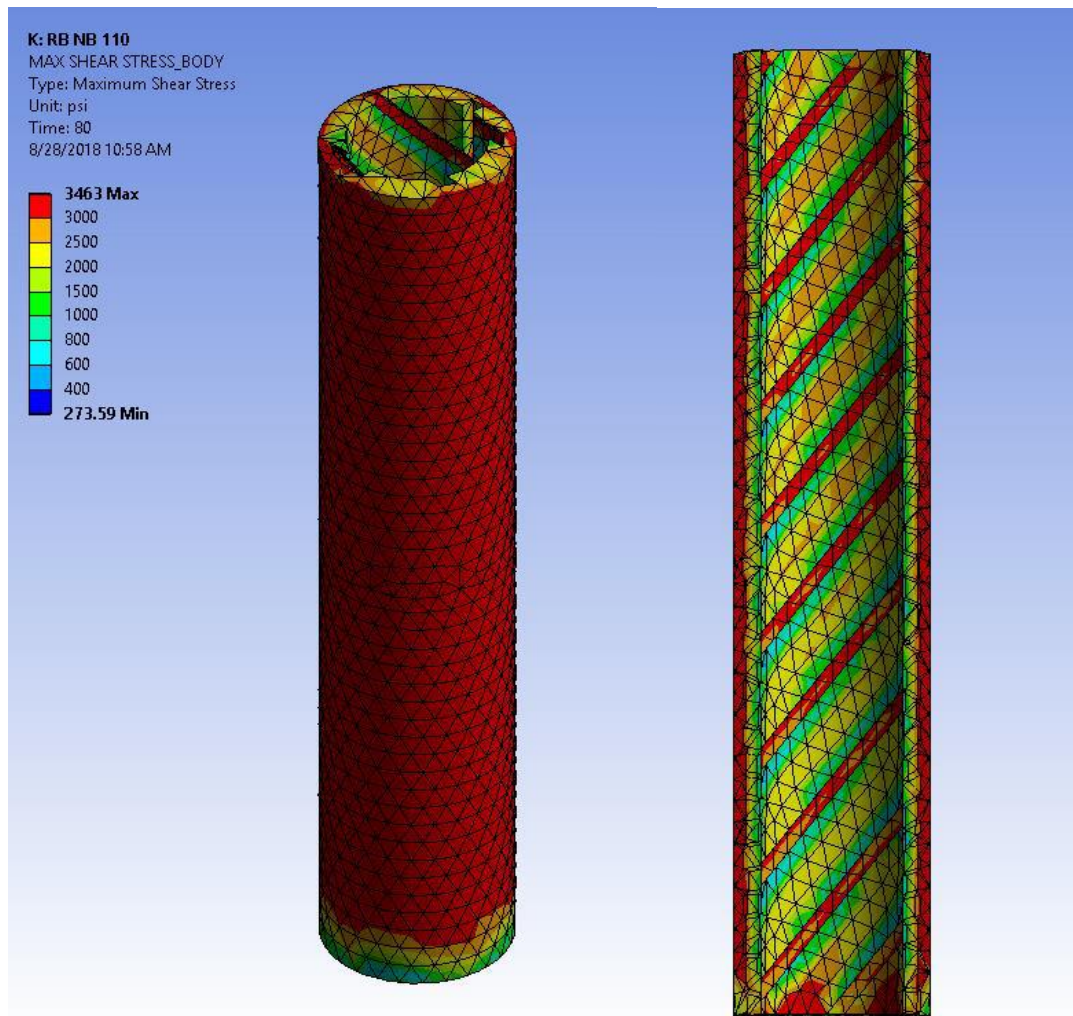
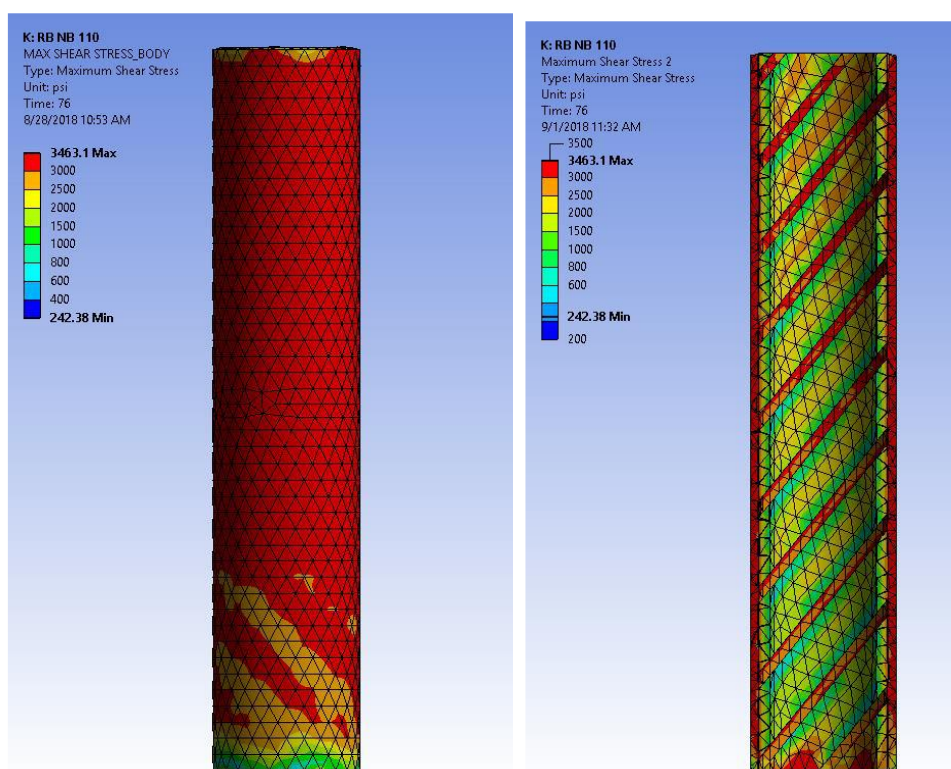


Рис. 5.11 Рівномірно розподілені напруження зсуву на зовнішній поверхні клею (ліворуч) і рівномірно розподілені напруження зсуву на внутрішній стороні клею (праворуч)

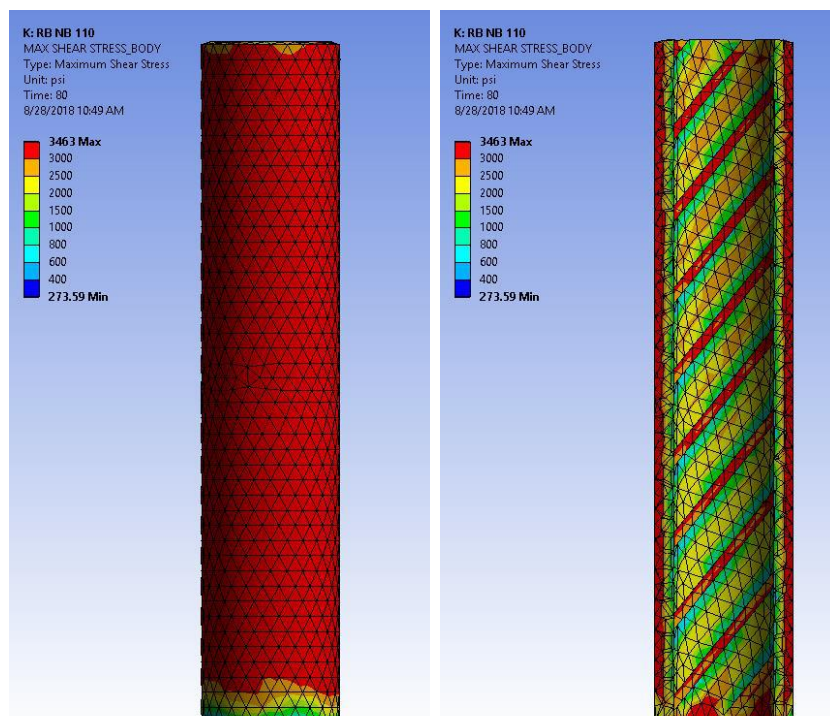
Модель *ApC - без КП* із передбачуваними властивостями адгезії при 40 °C демонструє деформацію на 0,8 мм. На малюнку 5.12 показані контурні графіки клейового шару *ApC - без КП* до руйнування, після руйнування та під час руйнування. У порівнянні з моделлю *PC - без КП*, модель *ApC - без КП* демонструє знижену вантажопідйомність, а також зменшений робочий об'єм. Порівняно з випробуваннями на висмикування арматурного стержня матеріалу №3, крива навантаження від переміщення моделі *ApC - без КП* потрапляє між графіками випробувань на висмикування та не вздовж траєкторії, як показано на рисунку 5.13. Також розподіл напружень зсуву клейового шару по діаметру отвору, демонструє рівномірний розподіл і

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						76
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

поступове зменшення напружень в найглибшій частині отвору в міру зменшення навантаження.

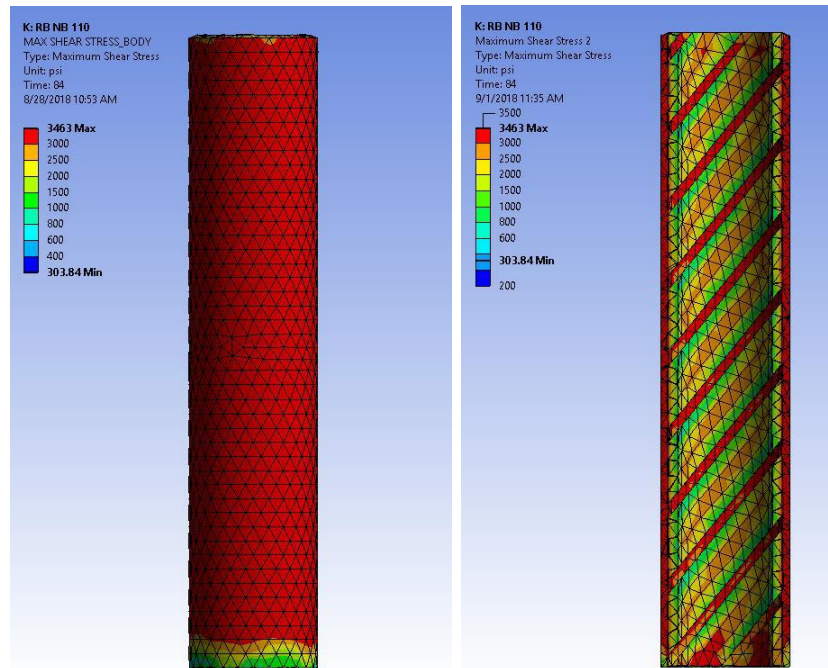


(a)



(6)

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						77
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		



(в)

Рис. 5.12 Контурний графік напружень зсуву клейового шару моделі *ApC* - без *КП* при 40 °С до руйнування (а), при руйнуванні (б) і після руйнування (в) у міру збільшення навантаження

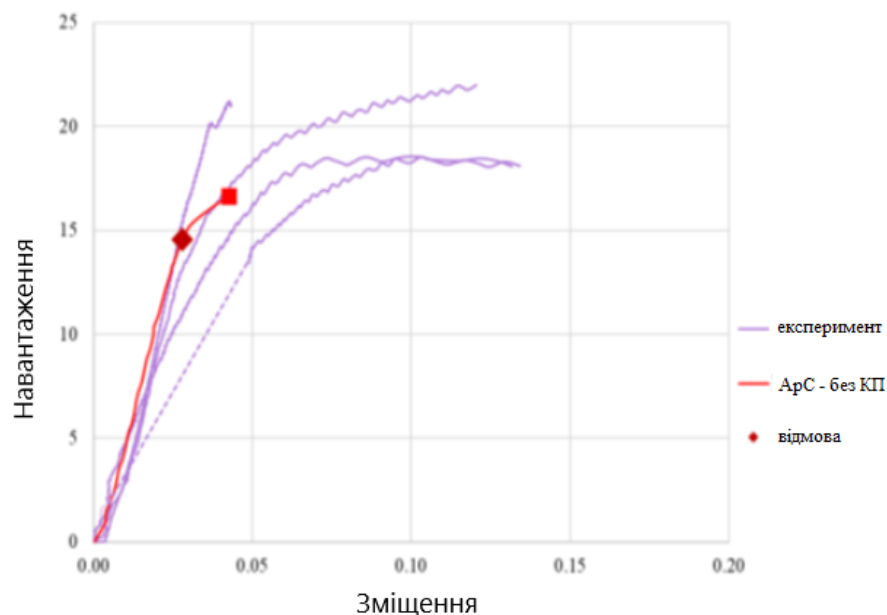


Рис. 5.13 Результати випробування арматурного стержня матеріалу №3 і результати моделі *ApC* - без *КП* з припущеними властивостями клейового матеріалу при 40 °С

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						78
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

За припущених властивостей клейового матеріалу при 25 °С модель *ApC* - без *KП* зазнає руйнування при 104,53 кН при зміщенні 1 мм, як показано на рисунку 5.14. Максимальні напруження зсуву, які спостерігаються в цій точці, становлять 34 МПа, а максимальні еквівалентні напруження, що спостерігаються, становлять 59 МПа. Збільшення вантажопідйомності на 30% було визначено за допомогою моделі *ApC* - без *KП* при 40 °С, яка відповідає поведінці властивостей матеріалу.

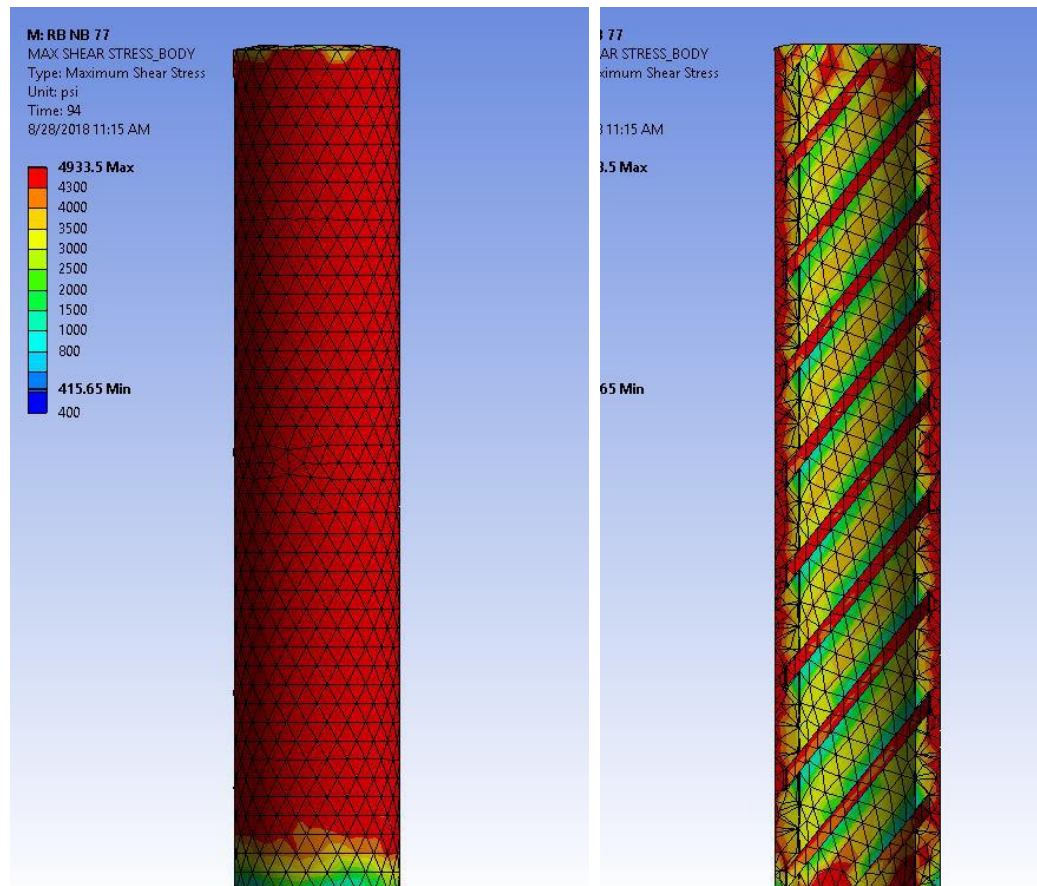


Рис. 5.14. Графік контуру напружень зсуву зовнішньої поверхні (ліворуч) і внутрішньої поверхні (праворуч) клейового шару моделі *ApC* - без *KП* при 25 °С при руйнуванні

При -40 °С модель *ApC* - без *KП* досягає максимальних напружень зсуву 43 МПа та максимального еквівалента напружень 76 МПа. Як і в попередніх моделях, що працювали з передбачуваними властивостями клейового матеріалу при -40 °С, відмову визначити не вдалося; пікові напруження зсуву

не могли рівномірно розподілитися по зовнішній поверхні клейового шару до того, як анкер продемонстрував збій.

5.5 Арматурний стержень з клейовим покриттям дна отвору

Спостерігалось, що модель *ApC* - з *KII*, змодельована з припущеними властивостями адгезії при 40 °C, руйнується при 92,66 кН при зміщенні 0,76 мм, досягаючи максимального напруження зсуву 25 МПа та максимального еквівалентного напруження 43 МПа. Це вказує на те, що додатковий адгезивний шар у нижній частині анкера збільшив вантажопідйомність системи на 20%, і що сила, яка передається від анкера до адгезиву, також передається нижньому шару, далі розподіляючи напруження та дозволяючи клею витримувати більші навантаження. Під час фізичних випробувань арматурний стержень продемонстрував на 10% більшу ємність, ніж зразки стержня з різьбою, випробувані за тих же параметрів. Контурний графік напружень зсуву для моделі *ApC* - з *KII* і розподіл напружень зсуву по діаметру отвору зображено на рисунку 5.15. Модель *ApC* - з *KII* при 40 °C найкраще відповідала навантажувальній здатності фізичних результатів арматурного стрижня, але не відповідала жорсткості.

При 25 °C клей у моделі *ApC* - з *KII* досягає максимальних напружень зсуву 34 МПа та максимального еквівалента напружень 59 МПа. Порухення адгезиву неможливо визначити через руйнування сталі в моделі кінцевих елементів при зростаючих навантаженнях. Подібним чином при -40 °C не вдалося визначити поломку, але модель *ApC* - з *KII* досягає максимального напруження зсуву 42 МПа та максимального еквівалентного напруження 75 МПа.

					MP 2119211 ПЗ	Аркуш
						80
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

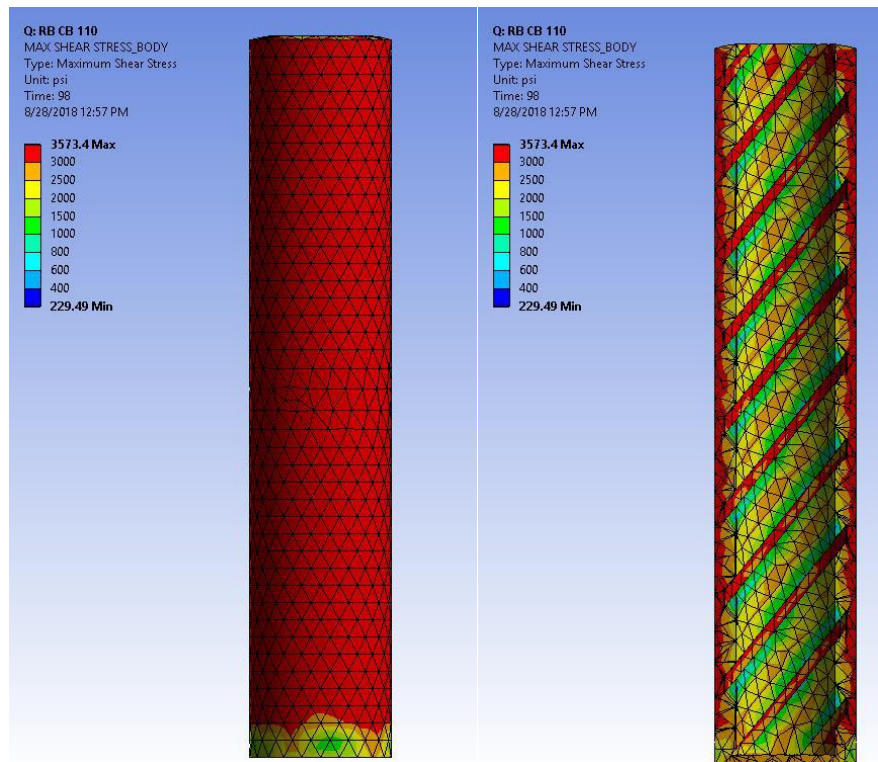


Рис. 5.15 Графік контуру напружень зсуву зовнішньої поверхні (ліворуч) і внутрішньої поверхні (праворуч) клейового шару моделі *АрС* - з *КП* при 40 °С при руйнуванні

5.6 Порівняння результатів фізичного випробування та методу скінченних елементів

На рисунку 5.16 наведено результати фізичних випробувань різьбового стержня, випробуваних при температурі від 43 °С до 49 °С, порівняно з результатами *РС* - без *КП* і *РС* - з *КП*, змодельованими при 40 °С. Спостерігається, що крива навантаження від переміщення *РС* - з *КП* є жорсткішою, при цьому руйнування відбувається при меншому об'ємі та вищій несучій здатності, тоді як крива навантаження від переміщення *РС* - без *КП* більш точно відповідає результатам фізичних випробувань. Таким чином, для подальших порівнянь буде використано модель *РС* - без *КП* з передбачуваними адгезивними властивостями при 40 °С.

Також розглянемо результати фізичних випробувань арматурного стрижня при 43°С до 49°С з результатами *РС* - без *КП* і *РС* - з *КП* при 40°С.

Результати для арматурного стержня показують більший коефіцієнт варіації, ніж результати для різьбового стержня; Встановлено, що залежність навантаження від переміщення моделі *ApC* - без *КП* тісно збігається з нижньою межею результатів фізичних тестів, тоді як залежність навантаження від переміщення моделі *ApC* - з *КП* приблизно відповідає тесту у верхній межі. Як наслідок, моделі *RB* виглядають більш різноманітними щодо того, чи сприяє додатковий нижній клейовий шар передачі навантаження; однак модель *ApC* - без *КП* відповідає більшості результатів фізичних тестів і тому вважається найкращою.

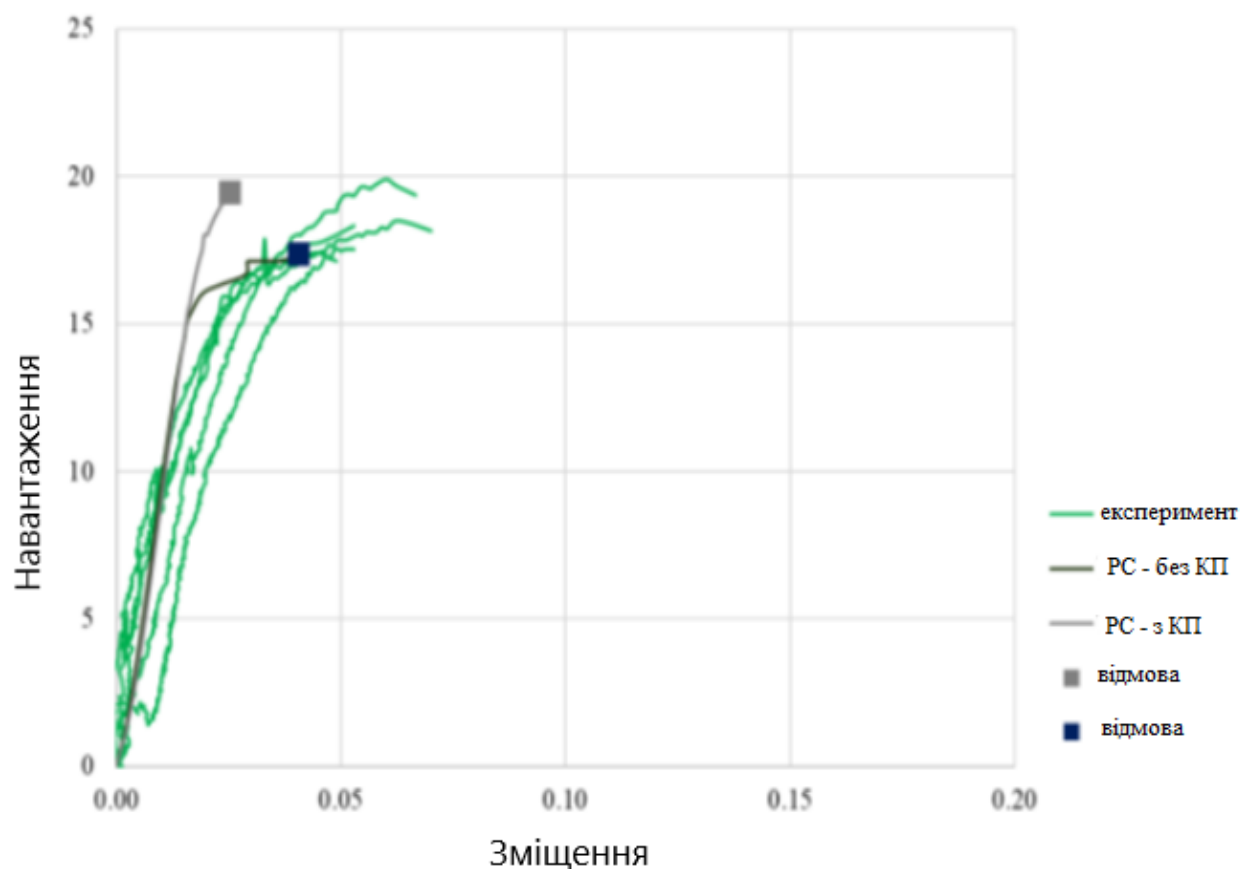


Рис. 5.16 Матеріал №3 результати для різьбових стрижнів у порівнянні з результатами *PC* - без *КП* і *PC* - з *КП*

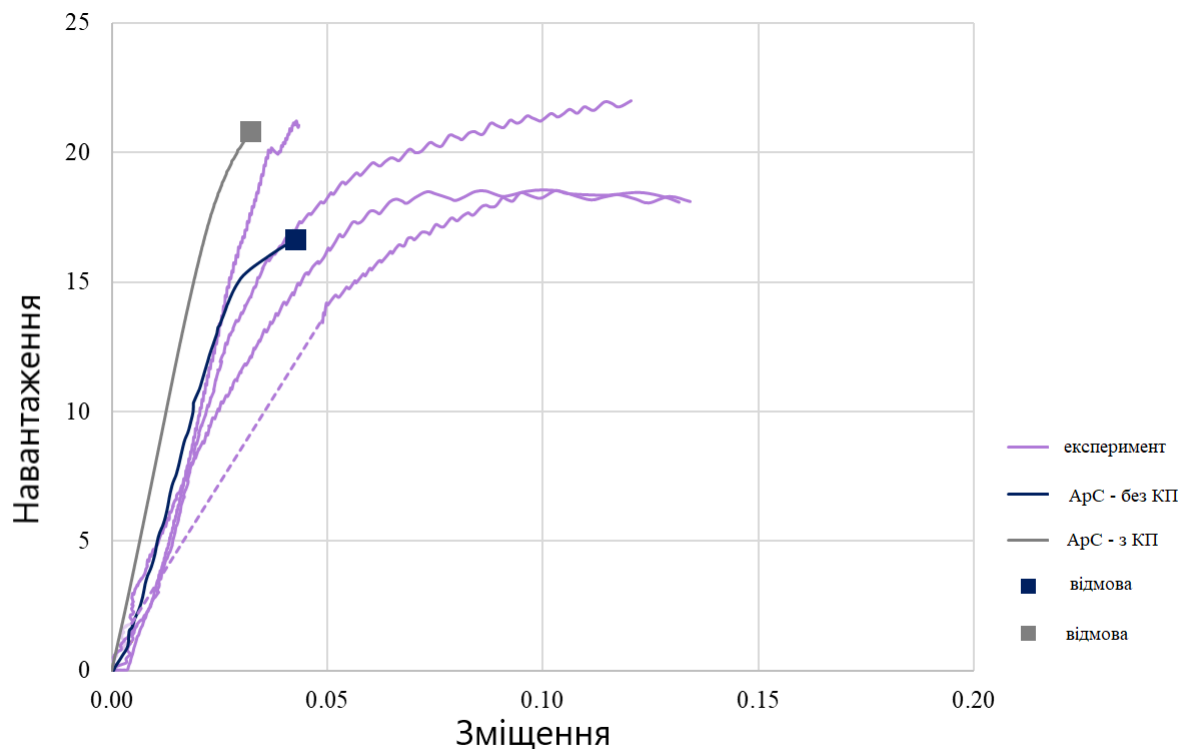


Рис 5.17 Результати випробування для матеріалу 3 і арматурного стрижня порівняно з результатами АрС – без КП і АрС – з КП.

5.7. Порівняння результатів натурних випробувань та моделювання методом скінченних елементів

Усі дані, отримані в результаті комп'ютерного моделювання та проаналізовані результати натурних спостережень приведено в таблиці 5.2. Аналіз таблиці показує, що клейовий матеріал в усіх випадках має більше значення максимального навантаження при температурі навколишнього середовища. При збільшенні температури несуча здатність клею зменшується. Моделювання методом скінченних елементів показало, що при відносних значеннях температури зовнішнього повітря відбувається руйнування стержня, а не клею. Різьбовий стержень і анкерний стержень дають досить схожі результати. Відмінність результатів МСЕ і натурних спостережень не перевищує 10%, отже, метод комп'ютерного моделювання підходить для розрахунку таких конструкцій.

Таблиця 5.1

Порівняння результатів моделювання методом скінченних елементів та
натурних досліджень

Назва стержня	Температура досліджу	Максимальне навантаження (згідно [2])	Зміщення (згідно [2])	Максимальне навантаження (згідно МКЕ)	Зміщення (згідно МКЕ)
РС – без КП	40°C	81,54 кН	1.02 мм 82ст	77.67 кН	1.02 мм
	25°C	92.92 кН	0.62 мм	96,39 кН	0.58 мм
РС – з КП	40°C	-	-	85.27 кН	0.76 мм
	25°C	-	-	111.21 кН	0.25 мм
АрС – без КП	40°C	72.06 кН	0.78 мм	74.15 кН	0.76 мм
	25°C	97.91 кН	1.08 мм	104.53 кН	1.02 мм
АрС – з КП	40°C	-	-	92.66 кН	0.76 мм
	25°C	-	-	Відмова анкера	Відмова анкера

5.7 Висновки з розділу

1. У середовищі програмного комплексу ANSYS 18.2 виконане моделювання роботи 4 типів анкерних з'єднань, які охопили 2 типи анкерів і 2 типи конструкції (з наявністю та відсутністю клею на дні отвору).

2. Для кожної з розглянутих моделей визначена несуча здатність з'єднання та величина зсуву при руйнуванні, які наведені в таблиці з розділу

5.6. Аналіз зведеної таблиці порівняння результатів експериментальних

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						84
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

випробувань та моделювання методом скінченних елементів дозволяє зробити викладені нижче висновки щодо достовірності прийнятої методики моделювання та правильності розроблення моделей.

3. Різьбовий стержень та анкерний стержень дають майже однакові значення максимальних напружень клейового з'єднання.

4. Найбільше напруження модель витримує при температурі навколишнього середовища (приблизно 25°C), при збільшенні чи зменшенні температури максимальні напруження зменшуються.

5. При різко від'ємних температурах програмний комплекс не може проаналізувати модель, так як відбувається руйнування металевого стержня.

6. При використанні моделі з клейовим покриттям дна отвору максимальні напруження можуть зростати більш ніж на 10%.

7. Програмний комплекс ANSYS 18.2 цілком підходить для моделювання такого типу з'єднань і дає результати, які відрізняються від даних натурних спостережень не більш ніж на 10%.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						85
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Виконані в магістерській роботі дослідження клейових з'єднань сталевих анкерів з бетонними масивами дозволили зробити такі висновки:

1. Аналіз літературних джерел показав, що клейові анкерні системи широко використовуються в будівництві. Їх роботу можна досліджувати експериментально або моделювати методом скінченних елементів.
2. Виявлені результати випробувань сталевих анкерів, вклеєних у бетонні моноліти різними клеями на основі епоксидних смол, при різних температурах виготовлення та експлуатації можна використати для верифікації методики і результатів чисельного моделювання.
3. Експериментальними дослідженнями, які були проведені Національною академією наук, техніки та медицини США встановлено, що:
 - клей на основі епоксидної смоли з амінним отверджувачем (матеріал 1) однаково добре працює при різних температурах;
 - у багатьох випадках при використанні матеріалу №1 сталевий анкер руйнувався раніше, ніж клей;
 - клей з бісфенольної епоксидної смоли з амінним отверджувачем (матеріал 2) має нижчу від матеріалу 1 міцність при нормальних і високих температурах, але краще працює при низьких температурах;
 - клей на основі уретанметакрилатної смоли з отверджувачем дибензоїлпероксид (матеріал 3) помітно зменшує жорсткість при збільшенні температури експлуатації;
 - вузли з анкерами з арматурного стержня мають більшу несучу здатність, ніж вузли з різьбовими стержнями при більшій мінливості;
 - збільшення діаметра отвору призводить до зменшення несучої здатності вузла з різьбовим анкером та до зростання несучої здатності вузла з анкером із арматури періодичного профілю.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						86
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

4. Розроблена методика моделювання роботи клейової анкерної системи за методом скінченних елементів у середовищі програмного комплексу ANSYS 18.2 включає рекомендації щодо вибору форми, характеристик, розмірів та кількості скінченних елементів, характеристик міцності та пружності бетону, сталі та клейових компонентів, які дозволять отримати достатньо точні результати моделювання.
5. У середовищі програмного комплексу ANSYS 18.2 виконане моделювання клейових анкерних вузлів з різьбовими анкерами та з анкерами з арматури періодичного профілю на трьох різних клеях, у результаті якого встановлені величини несучої здатності та деформативності вузлів при висмикуванні анкера в різних температурних умовах.
6. Порівняння результатів моделювання в середовищі ANSYS 18.2 з опублікованими результатами експериментальних випробувань, які були проведені Національною академією наук, техніки та медицини США, показало задовільну збіжність несучої здатності вузлів. Це дозволяє виконувати розрахунки вузлів на вклеєних анкерах методом скінчено-елементного моделювання.
7. У подальшому доцільно дослідити несучу здатність анкерних вузлів при їх виконанні в інших положеннях, відмінних від вертикального анкера, встановленого на верхню грань бетонного масиву.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Національна академія наук, техніки та медицини США. Інтернет-ресурс. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Національна_академія_наук_США
2. ASTM International (American Society for Testing and Materials). Інтернет-ресурс. Режим доступу: <https://www.astm.org/>
3. Американський інститут бетону (ACI) [Інтернет-ресурс]. Режим доступу: https://uk.wikiple.com/wiki/American_Concrete_Institute
4. ДБН В.2.6-162:2010. Кам'яні та армокам'яні конструкції. Основні положення. К., Мінрегіонбуд України, 2011. – 97 с.
5. ДБН В.2.6-98:2009 "Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення". К., Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.
6. ASTM E488 Standard Test Methods for Strength of Anchors in Concrete Elements [Інтернет-ресурс]. Режим доступу: <https://www.astm.org/>
7. AASHTO TP-84 Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate) [Інтернет-ресурс]. Режим доступу: <https://global.ihs.com/>
8. ДСТУ Б В.2.7-43-96 Бетони важкі. Технічні умови. К., Держкоммістобудування України, 1997 – 20 с.
9. ДСТУ EN 795:2017 «Індивідуальне спорядження для захисту від падіння. Анкерні пристрої. Вимоги та методи випробування». К.: ДП «УкрНДНЦ», 2019 р. – 37 с.
10. ДСТУ Б В.2.7-7:2008 Будівельні матеріали. Вироби бетонні стінові дрібноштучні [Інтернет-ресурс]. Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=25432
11. ASTM A194 2H стандартна специфікація матеріалу для гайок високої міцності та інших кріплень із внутрішньою різьбою, виготовлених із вуглецевої сталі. [Інтернет-ресурс]. Режим доступу: https://emk24.ru/wiki/astm_steels/stal_a194_grade_2h_sa194_grade_2h_6991657/
12. ASTM A500 Grade B Стандартна специфікація на холодногнуті, зварні та безшовні конструкційні круглі та профільні труби з вуглецевих сталей)

					MP 2119211 ПЗ	Аркуш
						88
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

[Інтернет-ресурс]. Режим доступу: <https://www.tottentubes.com/astm-a500-specification-information>

13. ASTM A354 Grade BD. Хімічні та механічні властивості болтів, гвинтів, шпильок та інших кріпильних виробів із легованої сталі. [Інтернет-ресурс].

Режим доступу: <https://boltport.com/specifications/astm-a354/>

14. ДСТУ Б В.2.6-145:2010. Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії. К.: Мінрегіонбуд України, 2010 р. – 52 с.

15. ДСТУ Б В.2.7-176:2008 (EN 206-1:2000, NEQ) Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови.

16. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками.

17. ДСТУ Б В.2.7-219:2009. Бетони. Метод прискореного визначення міцності на стиск.

18. ДСТУ Б В.2.7-220:2009. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010.

19. ДСТУ Б В.2.7-229:2009. Бетони. Ультразвуковий метод визначення міцності.

20. Закон України “Про охорону праці”, стаття 8 [Інтернет-ресурс]. Режим доступу: https://kodeksy.com.ua/pro_ohoronu_pratsi283_new/statja-8.htm

21. НПАОП 0.00-4.01-8 Положення про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту [Інтернет-ресурс]. Режим доступу: https://dnaop.com/html/32230/doc%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F_0.00-4.01-08

22. Стаття 168 Кодексу законів про працю України [Інтернет-ресурс]. Режим доступу: <https://i.factor.ua/ukr/law-40/section-211/article-3343/>

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						89
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Додаток А
ОХОРОНА ПРАЦІ

**Заходи захисту працівників у зимовий час на будівельному
майданчику**

Будівельні виробництва відрізняються низкою характерних особливостей, адже робітникам-будівельникам доводиться працювати як в умовах високих, так і низьких температур, а також при інтенсивному впливі негативних атмосферних явищ (вітер, дощ тощо) і сонячної радіації. Тому велика увага приділяється питанням охорони праці, техніки безпеки, тобто заходам, що захищають людину від впливу на його організм шкідливих умов, пов'язаних із виробничим процесом і умовами праці.

Умови праці – сукупність чинників виробничого середовища та трудового процесу, які впливають на здоров'я та працездатність людини у процесі її професійної діяльності.

За більш повним визначенням умови праці – це складне суспільне явище, яке формується в процесі праці під впливом соціально-економічних, технічних, організаційних і природних чинників, які впливають на здоров'я, працездатність, ставлення до праці, ефективність праці, рівень життя і розвиток людини як головної сили суспільства.

Умови праці характеризують технічні, санітарно-технічні, естетичні та організаційні показники.

Самопочуття людини і продуктивність її праці на будівельних роботах багато в чому залежать від довкілля, зміни температури, вологості, тиску і швидкості руху повітря.

Значний вплив на працездатність і фізичний стан людей мають низька температура навколишнього повітря, тривалі та сильні вітри. Зазвичай у холодну пору року навантаження на будівельників вище, ніж у теплу – це збільшує тепловіддачу робітника. Нормальна ж працездатність зберігається

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						90
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

лише в тому випадку, коли теплоутворення перевищує тепловіддачу й, отже, температура тіла не знижується. Теплоутворення залежить від швидкості поглинання кисню, характеру і кількості окислення їжі тощо.

У результаті працездатність людини знижується, вона швидше втомлюється, зменшується її уважність. Це, а також і незручність роботи в теплому одязі, може призвести до більшої кількості нещасних випадків, ніж у більш сприятливих теплих умовах.

Мікрокліматичні параметри, а саме робота у зимовий період, належать до санітарно-гігієнічних показників умов праці.

На будівельних об'єктах у зимовий час підприємства мають свою специфіку щодо умов праці, яка пов'язана з особливостями технологічного процесу. Ця специфіка характеризує вибір оптимальних режимів праці й відпочинку, стан виробничих і побутових приміщень, забезпечення працюючих засобами захисту тощо.

До нещасних випадків, викликаних дією чинників зимових умов, відноситься обмороження.

Отже, можна зробити висновок, що необхідно звертати особливу увагу на техніку безпеки при експлуатації будівельних машин, виконанні земляних робіт чи інших будівельних робіт у зимових умовах. При цьому слід керуватися низкою документів:

- будівельними нормами і правилами з техніки безпеки в будівництві;
- санітарно-гігієнічними нормами;
- правилами техніки безпеки для підприємств автомобільного транспорту;
- правилами техніки безпеки і виробничої санітарії при електрозварювальних роботах;
- правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів;
- інструкцією щодо заземлення пересувних будівельних механізмів й електрифікованого інструменту.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						91
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Повинні враховуватися також постанови про тривалість робочого дня і перерви в роботі для обігріву робітників при низьких температурах.

Небезпека переохолодження найбільш часто виникає при виконанні будівельних робіт у холодну пору року в умовах понижених температур і сильного вітру. Тому існуючим трудовим законодавством роботи на відкритому повітрі при сильному вітрі та в умовах низьких температур заборонені.

Згідно Закону України “Про охорону праці” [20], стаття 8: “На роботах зі шкідливими і небезпечними умовами праці, а також роботах, пов'язаних із забрудненням або несприятливими метеорологічними умовами, працівникам видаються безоплатно за встановленими нормами спеціальний одяг, спеціальне взуття та інші засоби індивідуального захисту, а також мийні та знешкоджувальні засоби.

Роботодавець зобов'язаний забезпечити за свій рахунок придбання, комплектування, видачу та утримання засобів індивідуального захисту відповідно до нормативно-правових актів з охорони праці та колективного договору.

У разі передчасного зношення цих засобів не з вини працівника роботодавець зобов'язаний замінити їх за свій рахунок. У разі придбання працівником спецодягу, інших засобів індивідуального захисту, мийних та знешкоджувальних засобів за свої кошти роботодавець зобов'язаний компенсувати всі витрати на умовах, передбачених колективним договором.

Згідно з колективним договором роботодавець може додатково, понад встановлені норми, видавати працівникові певні засоби індивідуального захисту, якщо фактичні умови праці цього працівника вимагають їх застосування”.

При роботі на холоді, необхідно, з однієї сторони, попередити сильне переохолодження організму працюючих, з іншого – забезпечити його швидке зігрівання з метою своєчасної нормалізації фізіологічних зрушень, що настали внаслідок охолодження.

Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата

МР 2119211 ПЗ

Аркуш

92

Для забезпечення безпечних умов роботи у зимовий період необхідно:

- під'їзні шляхи й пішохідні доріжки своєчасно очищати від снігу і посипати їх піском, шлаком або золою;
- місця складування будівельних матеріалів необхідно повністю очищати від снігу та льоду, інакше штабелі конструкцій при підтаванні можуть обвалитися і викликати нещасний випадок;
- періодично видаляти крижані бурульки, які утворилися над входами в будівлі, тротуарами, місцями проходів і проїздів;
- щоб уникнути обвалення покрівель від снігового навантаження дахи необхідно очищати від снігу та льоду, заздалегідь захистивши небезпечну зону скидання снігу;
- для захисту робітників від несприятливих метеорологічних умов необхідно передбачити приміщення для обігріву працюючих розмірами, визначеними з розрахунку $0,1 \text{ м}^2$ на одну людину в найчисленнішій зміні, але не менше 8 м^2 . Температура повітря в цих приміщеннях повинне бути не нижча за $+22^\circ\text{C}$.

Велике значення для безпеки людей, що працюють взимку, має одяг.

Захист робітників від переохолодження досягається шляхом забезпечення їх теплим робочим одягом та взуттям, встановленням режиму праці з періодичними перервами для обігріву в спеціальних приміщеннях.

Теплий одяг запобігає надмірному охолодженню організму. Фізичні властивості спецодягу, крім теплозахисних властивостей, мають забезпечувати випаровування поту з поверхні шкіри, тому що затримка випаровування призведе до зволоження одягу і збільшення силових витрат організмом.

За НПАОП 0.00-4.01-8 [21] “Теплий спеціальний одяг і спеціальне взуття (костюми на утепленій прокладці, штани на утепленій прокладці, куртки для захисту від понижених температур, кожухи, козушки, валянки, шапки-вушанки тощо) видаються працівникам із настанням холодної пори року. Порядок їх зберігання з настанням теплої пори року визначається роботодавцем з урахуванням інструкції з їх експлуатації”.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						93
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Зимовий робочий одяг повинен бути просторим, зшитим із натуральної (не синтетичної) тканини, на ваті.

Інколи навіть застосовуються робочі костюми з електропідігрівом. Вони володіють всіма необхідними якостями, зручні, легкі і забезпечують надійну теплозахист, але основний їх недолік – значна вартість.

Теплий одяг обов'язково повинен бути доповнений теплим взуттям та рукавичками. В якості взуття можуть застосовуватися валянки або краще гумові пористі формові чоботи, які володіють хорошими тепло- й гідроізоляційними властивостями. Існує також взуття з електропідігрівом.

Для захисту валянок від промокання можна скористатися простим засобом. На 1-2 секунди занурити низ валянка у воду, після чого обваляти змочений місце в пухкому снігу. Таку операцію слід повторити 7-8 разів до тих пір, поки на валянках не утворюється щільна крижана кірка.

Рукавички або рукавиці повинні бути найкраще шкіряні на хутрі. Працювати без рукавичок металевим інструментом не можна.

У холодний період року (температура зовнішнього повітря нижче 10°C) режим праці й відпочинку залежить від температури і швидкості вітру. Збільшення швидкості вітру на 1 м/с відповідає зниженню температури повітря на 2° С.

У статті 168 Кодексу законів про працю України [22] сказано: “Працівникам, що працюють у холодну пору року на відкритому повітрі або в закритих неопалюваних приміщеннях, вантажникам та деяким іншим категоріям працівників у випадках, передбачених законодавством, надаються спеціальні перерви для обігрівання і відпочинку, які включаються у робочий час. Власник або уповноважений ним орган, зобов'язаний обладнувати приміщення для обігрівання і відпочинку працівників”.

Під час роботи на будівельному майданчику у холодний період року надаються перерви у 10 хв. для обігріву та відпочинку у спеціальних теплих приміщеннях. Температура повітря в цих приміщеннях має бути не менше +23° С.

Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата

Для зовнішніх робіт несприятливими метеорологічними умовами, за яких надаються обов'язкові перерви для обігрівання, згідно [22] вважаються: температура повітря від 0 до -10°C при швидкості вітру 4...5 м/с; температура повітря від -10 до -15°C при швидкості вітру 2 м/с; температура повітря від -15 до -20°C при швидкості вітру до 2 м/с; у безвітряну погоду при температурі -20°C і нижче. Припинення роботи на відкритому повітрі при низьких температурах проводиться на підставі спеціальних рішень.

При температурі повітря нижче -45°C і швидкості руху повітря більше 12 м/с будівельні роботи поза населеними пунктами забороняються.

При I категорії (температура до -25°C) передбачаються перерви на відпочинок та обігрів на 10 хв. через кожну годину роботи. При II категорії (температура $-15...-25^{\circ}\text{C}$) передбачаються перерви у 10 хв. через 1 годину від початку роботи та через кожні наступні 50 хв. роботи. При III категорії (температура $-13...-19^{\circ}\text{C}$) передбачаються перерви на 15хв. через 1 годину від початку зміни, а після обіду через кожні 45 хв. роботи. При температурі $-25...-30^{\circ}\text{C}$, крім надання додаткових перерв, робочий день скорочується на 1 годину, а при температурі нижче -30°C працювати забороняється.

На будівельних об'єктах набули поширення і засоби колективного захисту. Вони представляють собою легкі укриття каркасного, тентового чи пневматичного типів. Такі укриття захищають окремі робочі місця або об'єкт будівництва в цілому. Ці засоби колективного захисту використовуються з підведенням тепла або без нього. Навіть без підведення тепла температура в таких укриттях у зимовий час буде на 10...15 $^{\circ}\text{C}$ вище температури навколишнього середовища за рахунок знаходження людей, роботи механізмів, сонячної радіації та інших показників. Таким чином забезпечується поліпшення метеорологічних умов праці.

Також при роботі на холоді використовують пристрої місцевого променевого обігріву.

У холодну пору року калорійність їжі повинна бути найвищою. Зв'язок між калорійністю і температурою майже лінійна. Якщо при температурі $+10^{\circ}\text{C}$

людині потрібно приблизно 3500 калорій на добу, то при температурі -40°C це число зростає до 4500...5000 калорій на добу. Обов'язковим є вживання гарячої їжі (хоча б гарячого чаю або кави).

Не слід забувати, що світловий день взимку відрізняється від літнього: взимку світловий день зазвичай більш короткий. Тому будівництво у зимовий період передбачає організоване штучне освітлення. Воно буде служити єдиним джерелом світла в темний час доби і дозволить виконувати більший обсяг роботи.

Також під час виконання робіт на будівельному майданчику у зимовий період необхідно дотримуватись особливих правил із техніки безпеки.

На будівельному майданчику при виконанні робіт повинні використовуватись надійне обладнання й електроінструменти. Вони повинні легко витримувати навантаження, пов'язані з роботою в сніг і мороз.

Взимку умови згоряння палива в двигунах погіршуються – велика кількість палива згорає не повністю, тому ймовірність отруєння окисом вуглецю більше, ніж влітку. Крім того, взимку двигуни часто прогріваються на відкритих і навіть закритих стоянках, що також сприяє отруєнню.

Щоб уникнути отруєння не допускається використовувати двигуни як індивідуальне опалення, а також їх прогрів понад 5 хв. у закритих приміщеннях. На стоянках машини слід розташовувати таким чином, щоб при прогріванні двигунів відпрацьовані гази не задувались вітром в кабінку машиніста.

При використанні паяльних ламп, жаровень, обігрівальних печей, а також факелів і багать необхідно дотримуватися достатньої відстань для того, щоб полум'я або іскри, що переносяться вітром, не потрапляли на легкозаймисті предмети або матеріали. У таких умовах працювати в одязі, забрудненому маслом, забороняється.

При застосуванні опалювальних та обігрівальних пристроїв, а також при роботі з відкритим полум'ям слід мати наготові справний вогнегасник, сухий пісок та інші засоби пожежогасіння.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						96
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Обмороження й опіки частин тіла – це специфічні ураження, що часто зустрічаються взимку та можуть призвести до тяжких наслідків.

Для захисту від обмороження потрібно, перш за все, мати хороший теплий одяг. При тривалому перебуванні на повітрі в морозні дні доцільно відкриті ділянки тіла змащувати будь-яким несолоним жиром.

Щоб уникнути «контактного» обмороження не можна чіпати вологими (наприклад, після зняття теплих рукавиць) руками металеві поверхні, охолоджені до температури -20°C і нижче. Рекомендується ті частини інструменту, до яких торкаються руки робітників, покривати пластиком, текстилем тощо.

Особливо небезпечне потрапляння палива на відкриті частини тіла. Це може викликати швидке обмороження, наслідки якого найбільш важкі, особливо тоді, коли паливо надходить під тиском.

Отже, під час робіт на будівельному майданчику у зимовий період робітники потребують специфічних засобів захисту. З метою запобігання нещасних випадків необхідно приділяти більшу увагу правилам техніки безпеки та захисту робітників.

					МР 2119211 ПЗ	Аркуш
						97
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		