

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра комп'ютерної механіки імені Володимира Марцинковського

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

Раціональне сполучення оболонок з шаруватих композиційних матеріалів у складі цільнокомпозиційного балону високого тиску

механіка

Виконав: студент групи КМ.м-11
спеціальності 131 Прикладна

ОПП «Комп'ютерна механіка»
Єгор ОЛІЙНИК

Керівник Дмитро ЖИГИЛІЙ

Рецензент

Суми – 2022 р.

Зміст

Зміст	2
Вступ	5
Розділ 1 З'єднання композиційних матеріалів з металами та іншими композиційними матеріалами.	7
1.1 Характеристика та поведінка скріплених композитних з'єднань.....	7
1.2 Конструкційні клеї	15
1.2.1 Механіка адгезії.....	16
1.2.3 Фактори, що впливають на ємність та цілісність клеєвих з'єднань.....	18
1.2.4 Загальні властивості клеючих матеріалів та адгерендів	19
1.2.5 Попередня обробка поверхні	20
1.2.6 Процес відбору	23
1.2.7 Види клеїв.....	25
1.2.8 Стандартні методи випробування конструкційних клеїв.....	27
1.2.9 Поширені причини руйнування клею.....	28
1.3 Комбіновані з'єднання.....	29
1.3.1 Огляд пов'язаної роботи	30
1.3.2 Переваги та застосування комбінованих з'єднань	33
Розділ 2 Особливості роботи шаруватих оболонок з композиційних матеріалів під дією внутрішнього тиску	36
2.1 Проектні підходи.....	36
2.1.1 Розрахунок допустимих напруг (РДН)	37
2.1.2 Підхід до проектування коефіцієнта навантаження та опору	38
2.1.3 Розрахункові навантаження	40
2.1.4 Фактори безпеки.....	41
2.1.5 Гарантовані механічні властивості	42
2.1.6 Пропонована філософія.....	43
2.1.7 Матеріальна нелінійність	44
2.1.8 Геометрична нелінійність	45
2.1.9 Граничні стани.....	45
2.2 Аналіз та проектування клеєвих композиційних з'єднань	46
2.2.1 Типи напружених станів, що розвиваються в композиційних з'єднаннях	47
2.2.2 Конфігурації з'єднань	47
2.2.3 Характеристика напруження-деформації адгезії.....	48

Розділ 3 Методи попереднього та поточного розрахунку балонів I та II класів та моделювання в ANSYS.....	51
3.1 Методи попереднього проектування балонів I класу.....	51
3.2 Методи попереднього проектування балонів II класу	59
Розділ 4 Оптимізація геометрії з'єднань на основі симуляційної моделі	63
4.1 Модифікований поліноміальний критерій міцності для шаруватих композитів за С.М. Верещакою.	63
4.2 План двофакторного чисельного експерименту з розрахунком коефіцієнтів взаємодій чинників.	64
4.3 Результати чисельних експериментів	70
Висновки	76
Перелік використаних джерел.....	77

Вступ

Актуальність теми: людство намагається перейти від джерел енергії, які вичерпуються до невичерпних серед таких є енергія вітру, енергія припливів енергія сонячного випромінювання. Цю електричну вироблену енергію потрібно складувати і одним серед способів накопичування є продукування водню з води.

Таким чином на цей час існує науково-практична проблема щодо зберігання водню у баллонах високого тиску нової форми та нових матеріалів. Серед таких є обраний для цього баллону шарувальний углепластик, а форма складається з еліптичних поверхонь.

Мета дослідження. Виходячи з актуальності й ступеня наукової розробки проблеми, метою дослідження є оптимізація геометрії з'єднань конструктивних елементів баллону високого тиску шляхом чисельного експерименту з використанням плану експерименту.

Для досягнення поставленої мети були встановлені наступні **завдання дослідження.**

1. Розрахувати балон високого тиску за нормами BPVE-X.
2. Побудувати скінченно елементу модель оболонки високого тиску з уточненою геометрією з'єднань конструктивних елементів посудини у вісеметричній постановці в програмному комплексі ANSYS APDL.
3. Виконати дослідження міцності напружено-деформованого стану оболонок внутрішнього тиску та їх з'єднань у складі посудини високого тиску за допомогою модифікованого поліноміального критерію міцності для тривимірного напруженого стану за С.М. Верещакою.
4. Методом планування експерименту визначити раціональні розміри приєднання з'єднань оболонок углепластику у складі посудини на основі проведеного числового експерименту на основі скінченної моделі.

Наукова новизна. На основі повнофакторного експерименту для чисельного моделювання скінченними елементами з'єднань оболонок углепластику у складі посудини високого тиску з углепластика складної форми з еліптичними днищами отримано поліпшені значення довжин з'єднань геометрії циліндра з днищем та днища з закладним патрубком за максимальної її міцності.

Практичне значення. Запропонована робота з поліпшення геометрії з'єднань у складі балону, підхід якої придатний до оптимізації геометрії з'єднань балонів високого тиску.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дослідження, що відносяться на захист, одержані автором самостійно або за його активної участі.

Апробація роботи. Основні положення наукової роботи планується відобразити в тезах ІХ Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві».

Розділ 1 З'єднання композиційних матеріалів з металами та іншими композиційними матеріалами.

1.1 Характеристика та поведінка скріплених композитних з'єднань.

Протягом останніх двох десятиліть або близько того було проведено ряд досліджень щодо характеристики структурної поведінки пултрузійного композиту з'єднання. Загалом існує три схеми з'єднань полімеру, армованого волокном: (1) болтове, (2) клейове та (3) комбіновані (болтові та скріплені). Болтове з'єднання є одним з найпоширеніших форми з'єднань у цивільному будівництві. Клейові з'єднання, як правило, призводять до катастрофічного збою без попередження. Якщо вища ступінь, якщо потрібне кінцеве обмеження, буде комбіноване болтове/скріплене з'єднання ефективний. Комбіновані з'єднання зведуть до мінімуму концентрацію напруги на зоні болтів/отворів за рахунок кращого розподілу напруги між з'єднаними елементами. Перевагою комбінованих з'єднань є додаткова вигода за допомогою затискної сили системи болт/гайка/шайба, яка необхідна для процесу затвердіння клею під час монтажу. Результати випробувань, отримані Метьюз вказали, що підвищення пластичності суглобів можна досягти за допомогою комбінованих з'єднань. Однак ефективність будь-якого з'єднання залежатиме від кількох факторів, включаючи тип клею(ів), підготовку поверхні, процес затвердіння, навколишнє середовище, прикладений крутний момент, відстань до краю та інші геометричні співвідношення для з'єднувальних елементів, а також геометрію з'єднання та прокладання. вгору.

Метьюз обговорив механічну поведінку та методи проектування одnobолтових з'єднань при подвійному зсуві. Характеристики міцності з'єднань, скріплених, обговорювали Метьюз. Втомна поведінка композитних болтових з'єднань була досліджена. Вони виявили, що розмір і товщина шайби сильно впливають на довговічність композитних болтових з'єднань.

Шеної та Хокінс провели дослідження впливу варіацій матеріалу та геометрії на поведінку склеєних трійників з FRP. У цьому дослідженні були представлені експериментальні графіки навантаження-прогину та відзначені фізичні характеристики суглоба під навантаженням. Спільне моделювання було виконано з використанням методів аналізу кінцевих елементів. Вичерпний огляд поведінки композитних болтових з'єднань був представлений. Огляд включав відповідні методи та стандарти механічних випробувань; обговорення механічних аспектів проектування, включаючи методи спільного проектування; міркування про вплив геометричних ефектів; вибір попереднього натягу кріплення; прогнозування руйнувань як статично, так і динамічно навантажених з'єднань; залежне від часу розслаблення

переднавантажена суглоба; вплив температури та вологи на міцність та руйнування з'єднань; і методи неруйнівної оцінки для моніторингу суглобів.

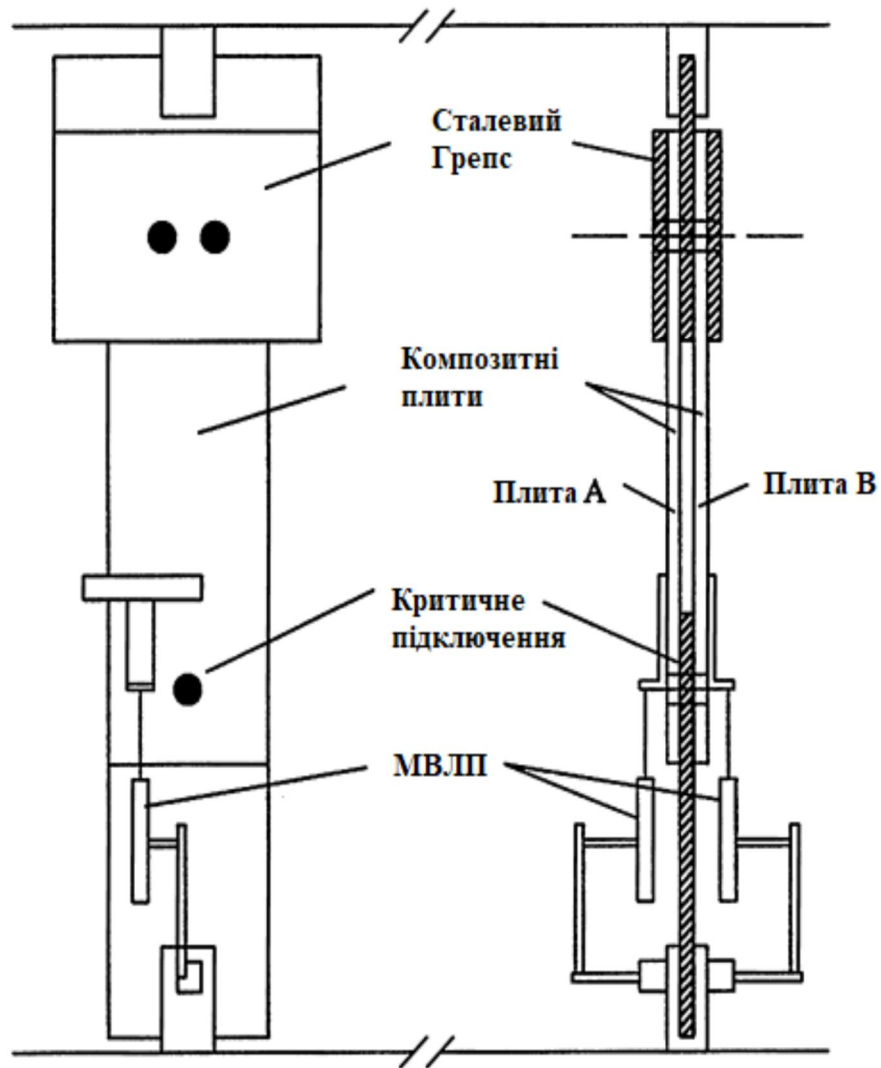
У 1991 році Дойл провів дослідження як механічних, так і адгезійних з'єднань FRP-матеріалів, використовуючи сталеві блоти (Дойль, «Поведінка болтових і клейових з'єднань у пластикових елементах, армованих скловолокном». Магістерська робота, Департамент цивільної інженерії, Університет Західної Вірджинії, Моргантаун, Західна Вірджинія, 1991). Прогнозування нормальної сили в суглобі було виконано за допомогою рівняння гвинтового тертя. За результатами його роботи було зроблено такі висновки:

1. Оптимальна крайова відстань у чотири рази перевищує діаметр сталевих болтів (4 ф).

2. Збільшуючи крутний момент болта, зберігаючи постійну відстань до краю, міцність з'єднання можна покращити до 30%.

Дойл надав деталі цього дослідження та представив загальний підсумок дослідницької програми роз'ємів для учасників FRP. У цьому звіті були представлені спрощені рівняння проектування для болтових та клейових з'єднань FRP.

Рознер повідомив про результати експериментальної та теоретичної програми досліджень болтових з'єднань для FRP. Експериментальна програма передбачала випробування загалом 102 одноболтових з'єднань з подвійним зрізом внахлест для вивчення впливу кількох конструктивних змінних, включаючи товщину елемента, t ; ширина елемента, w ; діаметр отвору (d), w/d ; крайова відстань (e), відношення діаметра отвору, e/d ; і орієнтація волокна. Загалом 215 зразків пултрузійного композитного болтового з'єднання було випробувано для визначення властивостей матеріалу на стиск, розтяг і зсув. Було перевірено три однонаправлені орієнтації волокна, а саме: 0 градусів, 45 градусів і 90 градусів. Різні режими руйнування з'єднань описуються моделлю кінцевих елементів на основі критерію руйнування Цай-Ву, який використовувався для прогнозування поведінки кожного з'єднання. Вказана модель враховує ефекти через товщину та контактну дію пластини кріплення.



Малюнок 1.1 - Випробувальна установка пултрузійного композитного болтового з'єднання

Результати цього дослідження показали, що міцність з'єднання можна покращити шляхом збільшення однієї або кількох із таких змінних:

1. товщина елемента,
2. співвідношення ш/д,
3. співвідношення е/д
4. елемент ширина.

Детальний опис дослідницької програми представлений Рознером.

Купер і Турві повідомили про результати всебічного дослідження 81 зразка пултрузійного з'єднання з болтами. У цьому дослідженні було досліджено як геометрію з'єднання, так і вплив крутного моменту затиску болта на кінцеву міцність з'єднання. Дослідження охоплювало як з'єднання з

подвійним нахлестом, так і з одним болтом. Ґрунтуючись на своїх результатах, автори надали рекомендації щодо значень e/d і $ш/d$ для пултрузійних композитних з'єднань. Турвей представив огляд літератури та результати серії випробувань на розтягування одного болта для пултрузійних композитів. Результати випробувань показали, що невелике ковзання болта відбувається навіть тоді, коли отвори номінально щільно прилягають, і що зміщення болта при поломці змінюється від 5 до 10-кратного початкового значення ковзання. Було також повідомлено, що початкова жорсткість болтових з'єднань не сильно змінюється залежно від відношення відстані до краю до діаметра болта (e/d), але збільшується зі збільшенням відношення ширини до діаметра ($ш/d$) і як позаосьовий кут зменшується.

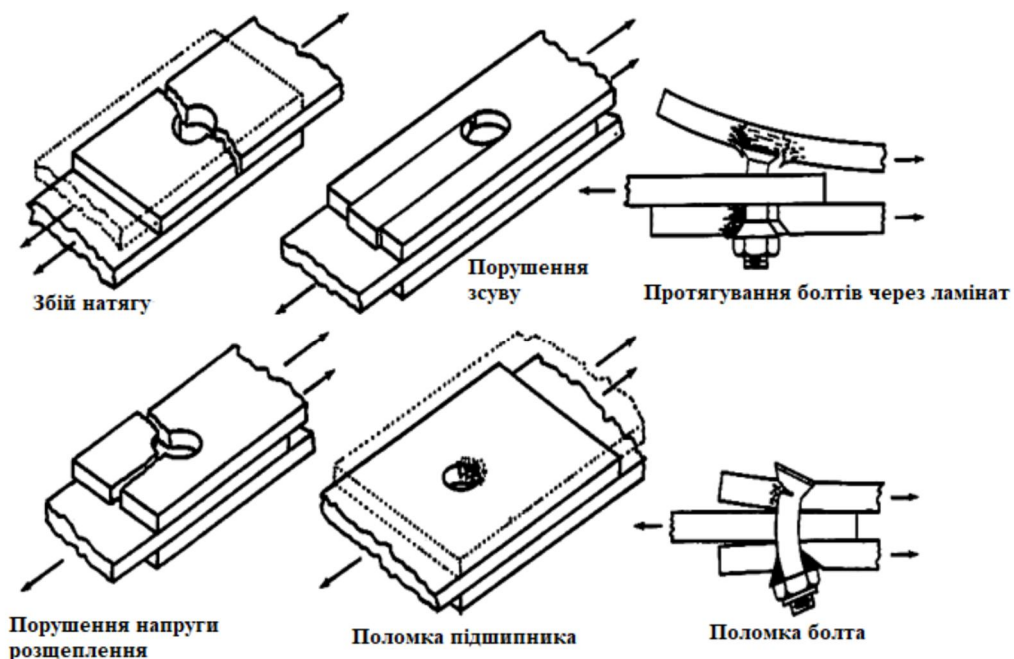
Роботи з дослідження використання болтових з'єднань для композитних конструкцій були розпочаті аерокосмічною промисловістю Сполучених Штатів у середині 1960-х років. На основі численних досліджень, проведених промисловістю та університетами, включно з дослідженнями анізотропності та крихкості полімерних композитів, було розроблено нову оплетку з металу та композиту спеціально для композитних структур. (На жаль, це не так для пултрузійних композитів, де стандартні металеві болти, розроблені головним чином для металевих конструкцій, наразі використовуються для з'єднання композитів з ПФП.) Ці спеціальні механічні кріплення мають більшу площу хвостового сліду для підвищення ефективності з'єднання композиту. Крім того, дослідження довговічності та сумісності матеріалів призвели до відмови від використання алюмінієвих кріплень через їхню чутливість до гальванічної корозії. Гальванічна корозія виникає, коли метали знаходяться в прямому контакті з вуглецевими композитами, що призводить до корозії матриці композитів.

Акцент у цьому посібнику робиться на композитних з'єднаннях, навантажених на «розтяг», а не на «стиск». Причина такого акценту на розтягуючих з'єднаннях полягає в тому, що композитні з'єднання, що піддаються стисненню, менш чутливі до геометрії з'єднання (наприклад, відстань між краями, ширина та товщина) і, як правило, є міцнішими, ніж з'єднання, піддані розтягувальним зусиллям.

Загалом існує сім видів руйнування пултрузійних композитних болтових з'єднань, що піддаються розтягувальним силам:

1. Поломка підшипника
2. Порушення зрізу
3. Порушення натягу сітки
4. Порушення розтягування (розтягнення та зсув)
5. Поломка болта
6. Помилка пробивання (протягування болта через ламінат)
7. Будь-яка комбінація цих режимів.

На малюнку 1.2 описано загальні режими руйнування одноболтових композитних болтових з'єднань. Перші чотири види руйнування вважаються основними (поширеними) способами руйнування пултрузійних композитів, як спостерігалось та повідомлялося в дослідженні. Для композитних болтових з'єднань режим руйнування підшипника є набагато менш катастрофічним, ніж інші види руйнування, такі як натяг, зсув, протягування болта через ламінат, розрив-розтяг, руйнування підшипника або болта (мал. 1.2). Щоб забезпечити ефективну конструкцію болтового з'єднання, навантаження на підшипник має бути якомога меншим на найбільш критичних кріплення в композитній конструкції. Використання міцніших кріплень допомагають вимагають більшої несучої міцності, яка зазвичай недоступна для більшості готових односпрямованих пултрузійних композитів. Насправді кращими є слабші болти, сумісні з обмеженою несучою міцністю пултрузійних композитів.



Малюнок 1.2 - Режими руйнування композиційних болтових з'єднань.

Напруга руйнування підшипника залежить від міцності композитів на стиск. Таким чином, для заданої сили зсуву болта (тобто заданої загальної площі поперечного перерізу болтів) найефективнішою стратегією є використання кількох болтів малого діаметра, а не меншої кількості болтів великого діаметра, для створення більшої опорної площі.

Поломка підшипника відбувається в зоні безпосереднього контакту між болтом і композитним елементом і, як згадувалося раніше, викликана в основному надмірними стискаючими напругами, які виникають на поверхні межі отвору. Пошкодження підшипників для болтових з'єднань з обмеженнями виникає внаслідок вигину або «витягу», тобто руйнування композиційного матеріалу від розшарування в кінці. Відповідно до Посібника з проектування конструкційних пластмас, міцність підшипника визначається як середнє напруження підшипника при деформації 4% діаметра болта. На міцність з'єднання впливає кілька факторів. Наприклад, збільшення затискного моменту та використання відповідного діаметру шайби збільшить опорну міцність з'єднання.

Літл і Маллік описують один із методів покращення опорної міцності композитного ламінату, який полягає у застосуванні бокового тиску затиску, розподіленого навколо отвору за допомогою шайби або манжети. Їхні результати показали, що застосування невеликого тиску при затиску (наприклад, шляхом затягування пальцями) може значно збільшити статичну стійкість до опори. Це збільшення ємності пояснюється ефектом бічного обмеження, що забезпечується шайбою, і опором тертя проти ковзання з'єднання. Крюз досліджував цей ефект, піддаючи композитні з'єднання втомним навантаженням. Він повідомив про такий же ефект збільшення циклічної несучої здатності. Однак він також виявив, що збільшення міцності опори штифта має тенденцію нівелюватися при високому тиску затиску. Для пултрузійних односпрямованих композитів Купер і Турві повідомили, що злегка затиснуті та повністю затиснуті з'єднання демонструють збільшення на 30% і 96% відповідно середніх пошкоджень навантажень.

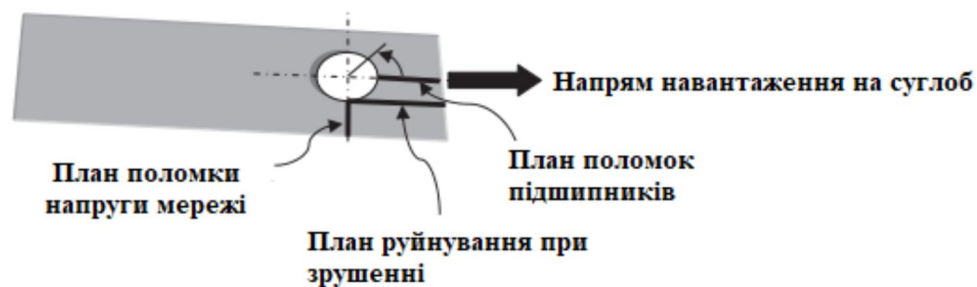
На несучу міцність болтового композитного з'єднання також впливає архітектура волокон композитного елемента, а також послідовність укладання ламінату повідомили про вплив малюнка отворів на опорну міцність. Вони виявили, що послідовне додавання ще одного болта не вплинуло на несучу міцність з'єднання, тоді як введення додаткового отвору в тандемі зменшило несучу міцність з'єднання менше ніж наполовину порівняно з з'єднанням з одним отвором. Відмова підшипника починається у вигляді тріщин на краях отвору під болт і поширюється до краю обмеженої зони, де відмова має тенденцію повернутися до режиму локальної нестабільності та розшарування.

Деякі геометричні параметри з'єднання мають великий вплив на несучу міцність з'єднання, тоді як інші впливають мінімально або зовсім не впливають. Наприклад, збільшення відношення діаметра отвору до товщини (d/t) призведе до помітного зниження несучої міцності композитних болтових з'єднань. У той час як інші геометричні параметри, такі як відношення між кромками та діаметром отвору (e/d) і відношення ширини з'єднання до діаметра (w/d), контролюють кінцеву форму руйнування з'єднання, вони мало впливають на з'єднання. несучої міцності, як зазначено в дослідженні.

Міцність чистого перетину на розрив є функцією як геометрії з'єднання, так і міцності композитного матеріалу (див. мал. 1.2). Передбачається, що пов'язаний механізм руйнування спричинений дотичними або стискаючими напруженнями на краю отвору, і він, ймовірно, має місце, коли співвідношення діаметра отвору до ширини (d/w) велике, а відношення навантаження на байпас до підшипника високе. У цьому випадку тріщини будуть поширюватися в поперечному напрямку до напрямку навантаження. На малюнку 1.3 показано різні плани відмови для композитного болтового з'єднання.

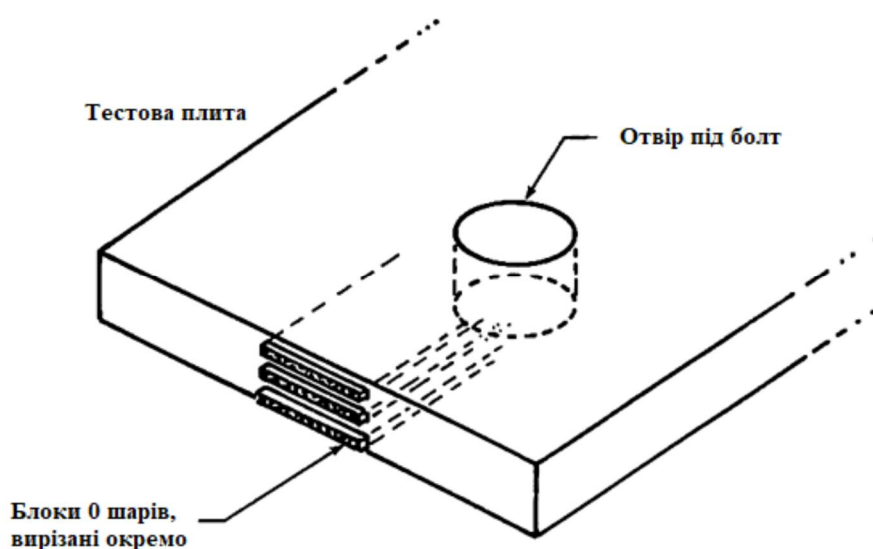
Відмови від зсуву слід розглядати як окремий випадок відмов підшипників. У більшості випадків поломка від зсуву є наслідком поломки підшипника з короткою відстанню до краю, e (див. мал. 1.3). Однак для високоортоотропних композитів руйнування при зсуві відбуваються на дуже великих відстанях до країв. Руйнування зсувом є комбінацією руйнувань на площині та міжшарових руйнувань на зсув. Руйнування при зсуві також може характеризуватися руйнуванням «відколу» в одній площині, де видима поперечна міцність ламінату на розтяг менша, ніж відповідна міцність на зсув у площині. Болтові композитні з'єднання зазвичай розроблені для уникнення цього крихкого способу руйнування.

Зазвичай для визначення міцності композитних з'єднань на зсув використовуються чисті зразки несучих з'єднань. Це призвело до неправильної інтерпретації експериментальних результатів, які зазвичай вказують на те, що менші співвідношення e/d знижують міцність болтового композитного з'єднання. Насправді передчасне руйнування зразків нахлестка зсуву з малими співвідношеннями e/d при нижчих опорних напруженнях у з'єднанні порівняно з граничним напруженням шаруватого матеріалу спричинено появою руйнування на поверхнях зсуву, що запобігає виникненню режим відмови підшипника.



Малюнок 1.3 Плани аварій композитного болтового з'єднання.

У особистому спілкуванні зі мною в 1999 році Л. Дж. Харт-Сміт сказав: «Не існує такого поняття, як «міцність» матеріалу на зсув для композитних матеріалів у спосіб, який прийнято вважати для пластичних металів». Відмови від зсуву є вторинним розповсюдженням локального пошкодження поруч із болтом. Щоб уникнути або зменшити ймовірність катастрофічного руйнування композитів із FRP при зсуві, слід вибрати оптимізовану структуру волокон, принаймні для тих частин, які присутні в зоні з'єднання. Відмови від зсуву є поширеними для візерунків волокон, які одночасно багаті шарами під кутом 0 градусів і дефіцит шарів під кутом 90 градусів (див. мал. 1.4). Випробування борно-епоксидних ламінатів для волокнистого малюнка з 50% шарів під кутом 0 градусів і 50% шарів під кутом ± 45 градусів продемонстрували однакову міцність з'єднання та режим руйнування, коли $e/d = 2$, а також коли $e/d = 22$.



Малюнок 1.4 Порушення зрізу в отворах під болти в композитних ламінатах згруповані паралельні шари.

1.2 Конструкційні клеї

«Клей» — це загальний термін, який використовується для речовин (наприклад, цементу, клею та пасти), здатних утримувати матеріали разом шляхом поверхневого прикріплення. Адгезія пов'язана з міжмолекулярними силами, що діють через поверхню розділу, і передбачає врахування поверхневих енергій і міжфазного натягу. Матеріали, що з'єднуються, називаються «приклеювачами» або «субстратами».

Клеї мають кілька переваг для з'єднання пултрузійних композитних елементів:

1. Більш рівномірний розподіл суглобових напруг
2. Більші зони навантаження
3. Чудова стійкість до втоми та ударів
4. Високе співвідношення міцності до ваги
5. Порівняно жорсткі зв'язки
6. Можливість з'єднання різнорідних матеріалів (при відповідній обробці поверхні)

Існують також деякі обмеження щодо використання конструкційних клеїв у з'єднаннях:

1. Труднощі із забезпеченням належного рівня попередньої обробки поверхні
2. Труднощі під час перевірки цілісності з'єднань (процедури перевірки)
3. Тривалий час затвердіння та необхідність надання тимчасової підтримки під час затвердіння
4. Особливі вимоги до зберігання
5. Потенційно короткий термін придатності (робочий термін)

У пункті 1.2 наведено переваги та обмеження клейового склеювання. Постійний розвиток вдосконалених рецептур, спрямованих на полегшення їх використання, переконливо свідчить про те, що клеї все частіше будуть вважатися кращим способом з'єднання структурних композитів.

1.2.1 Механіка адгезії

Як тільки міжфазний контакт між зчепленням розвивається за сприятливих термодинамічних умов, зчеплення не затвердіння забезпечує передачу напруги. В даний час існує чотири основні теорії адгезії:

1. Механічне блокування
2. Поглинання
3. Дифузія
4. Електростатичний

Переваги та недоліки клейових з'єднань

Переваги

- Може приєднатися до різнорідних прихильників
- Ефективно з'єднує тонкі клеї
- Може створювати рівномірний розподіл напруги зсуву на межі розділу, що опосередковано підвищує опір втомі композитного з'єднання
- Може створювати гладку поверхню без змін
- Лінія Бонда виконує роль герметика
- Усуває потребу в польовому обладнанні для свердління отворів, герметизації та застосування крутного моменту
- Створює більш легку структуру порівняно з болтовими з'єднаннями

Обмеження

- Вимагає відповідної попередньої обробки поверхні
- Не можна використовувати з усіма полімерами (наприклад, поліетилен практично неможливо з'єднати клеєм)
- Вимагає належного проектування та тестування
- Вимагає тривалого часу затвердіння та спеціальних умов затвердіння тиску, температури та контролю вологості для сприяння затвердінню та розвитку міцності клеїв
- Чутливість до вологи, підвищеної температури, пожежі та впливу мінусових температур

- Чутливість до тривалих навантажень, особливо при високих температурах
- Займистість і токсичність диму під час займання деяких клеїв, таких як епоксидні

Серед цих чотирьох теорій механізм поглинання є загалом прихильність. Детальні обговорення цих теорій можна знайти в літературі.

1.2.3 Фактори, що впливають на ємність та цілісність клеєвих з'єднань.

Кілька факторів можуть впливати на ємність і цілісність клейового з'єднання:

1. Підготовка поверхні
2. Механічні властивості клею та зчеплень
3. Товщина клею та клеїв
4. Геометрії з'єднань
5. Умови обслуговування

1.2.4 Загальні властивості клеючих матеріалів та адгерендів

Як правило, клеї, що використовуються з полімерними композитами, мають характеристики, подібні до композитів, які вони з'єднують. Характеристики напруги-деформації клеїв є нелінійними, і на їх механічні властивості суттєво впливають підвищені робочі температури та вологість, а також тривалі навантаження.

Підготовка поверхні відіграє домінуючу роль у надійності клейового з'єднання. Властивості поверхні, такі як змочуваність і шорсткість композиту, впливають на здатність конструкційних композитів надійно з'єднуватися. Змочування — це показник здатності клею розподілятися по твердій поверхні. Рідини мають тенденцію до потрапляння кульок на поверхні, які мають погані характеристики зволоження. Такі матеріали, як поліетилен і поліпропілен, мають низьку змочуваність і дуже важко склеюються. Навпаки, пластики, такі як епоксидні та поліефірні, легко змочуються та склеюються. Шорсткі поверхні, що з'єднуються, зазвичай покращують ефективність зчепленневого з'єднання за рахунок розвитку більшого механічного зчеплення.

Більшість клеїв мають вищу здатність до стиснення та зсуву, ніж міцність на розрив і відрив. Крім того, більшість демонструє значно більші деформації зсуву, ніж деформації розтягування до руйнування. Як правило, перевагу надають більш тонким лініям з'єднання для досягнення максимальної міцності та жорсткості з'єднання. Більш тонкі лінії з'єднання більш стійкі до розтріскування при згинанні, і вони демонструють меншу повзучість. Вони також демонструють менші залишкові термічні напруги та мають меншу ймовірність несприятливих включень.

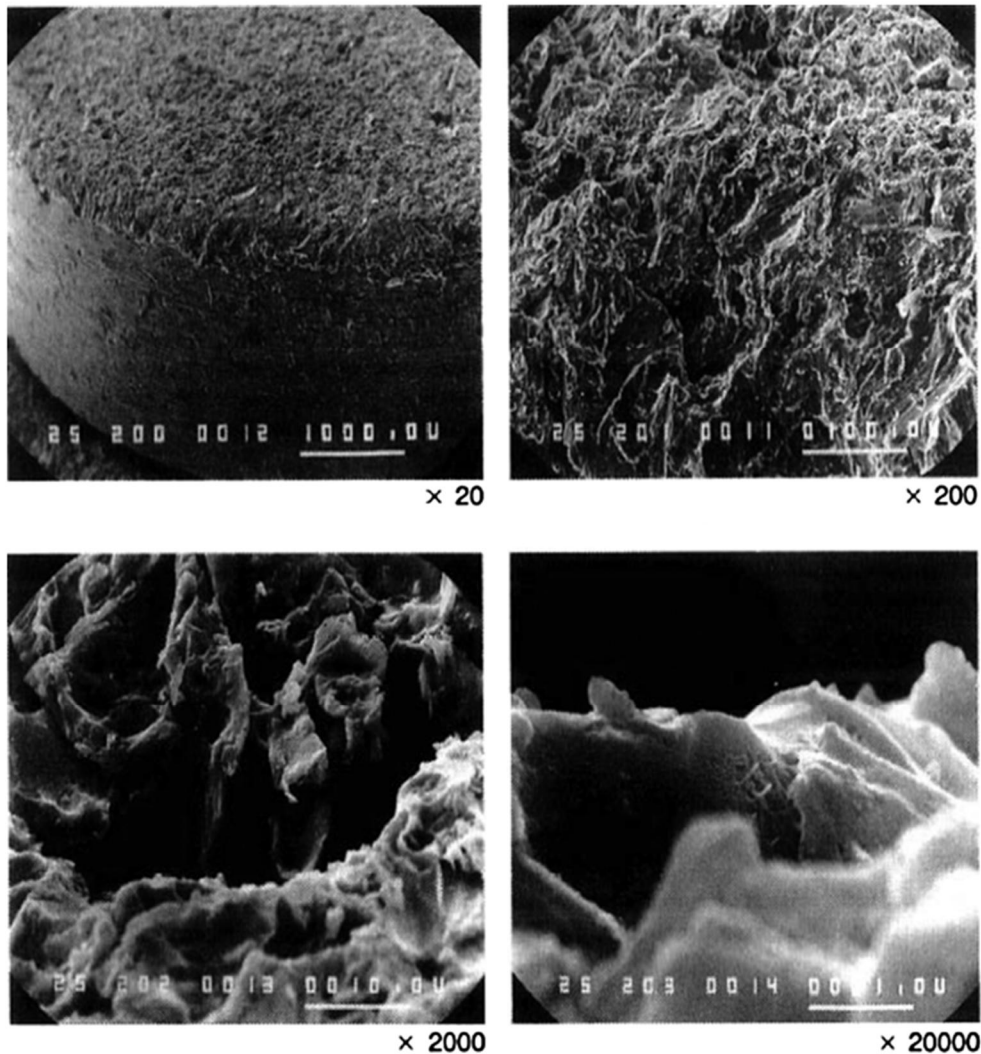
Незважаючи на те, що клейові з'єднання забезпечують більш рівномірний розподіл напруги в з'єднанні порівняно з механічними з'єднаннями, концентрація напруги все ще присутня. Концентрація напруги, що виникає в простому з'єднанні внахлест, викликає значне занепокоєння в полімерних композитах. Ці напруги можуть спричинити відшарування вздовж кінців з'єднань, викликаючи міжшарове руйнування ламінату. З цієї причини бажано, щоб скріплені зчепленням композитні деталі були сконструйовані таким чином, щоб вони відчували напругу паралельно своїй арматурі. Дотримання малих кутів між шарами ламінату також може мінімізувати можливість розшарування.

1.2.5 Попередня обробка поверхні

Попередня обробка поверхні вважається найважливішим аспектом процесу склеювання. Пильна увага до підготовки або попередньої обробки поверхні має вирішальне значення для ефективності клейового з'єднання. Щоб забезпечити надійну міцність і довговічність з'єднання, необхідним є виробництво шорсткої поверхні, очищеної від забруднень (зокрема будь-яких хімікатів, воску чи жиру, що є результатом впливу або після процесу виготовлення композиту). Неадекватна попередня обробка поверхні зазвичай є основною причиною руйнування з'єднань. Рекомендується попередня обробка поверхні для видалення забруднень і слабких поверхневих шарів. Крім того, належна попередня обробка поверхні забезпечує умови поверхні, які можуть бути легшими для склеювання. Він також може вводити нові хімічні групи, щоб забезпечити, принаймні у випадку склеювання композитів з металом, оксидний шар, який є більш сприйнятливим до зчеплення. Підготовка поверхні та процедури очищення в першу чергу залежать від матеріалів, які з'єднуються (тобто від природи з'єднань) і середовища експлуатації. Більшість конструкційних композитів вимагають відносно простої підготовки поверхні. Візуальна оцінка ефектів попередньої обробки була полегшена, зокрема, завдяки електронній мікроскопії в її різних формах, приклади яких показано на мал. 1.2.1

Оцінюючи конструкційні зчеплення для використання в конкретному проекті, інженер повинен розуміти, що висока початкова міцність з'єднання, як правило, не настільки важлива, як довгострокова довговічність з'єднання, продиктована стійкістю до навколишнього середовища межі клею/клею. Крім того, має бути зрозуміло, що попередня обробка поверхні, значною мірою впливаючи на довговічність лінії з'єднання, зазвичай має менший вплив на початкову міцність клею.

Композитні матричні матеріали, які легко змочуються (тобто більшість термореактивних смол, епоксидних смол і поліефірів), як правило, вимагають видалення забруднюючих речовин (таких як засоби для звільнення від форм, масла та бруд) перед склеюванням. Підготовка поверхні для термореактивних композитів зазвичай досягається незначним стиранням або очищенням розчинником. Навпаки, такі термопласти, як поліетилен і поліпропілен, не можуть бути надійно з'єднані за допомогою клею, якщо не використовується інтенсивна обробка поверхні.



Малюнок 1.2.1 Скануючі електронні мікрофотографії (SEM) бруска яскравої сталі, обробленого пескоструминним способом (поверхня під кутом 45 градусів).

Для композитів, які легко змочуються, стирання поверхні зазвичай підвищує міцність з'єднання. Однак для композитів, які важко змочуються, поверхнєве стирання може мати незначний або, можливо, несприятливий вплив на їхню здатність до склеювання. Для цих композитів стирання поверхні може утримувати клей у верхній частині шорстких ділянок і перешкоджати повному контакту.

Підготовка поверхні є обов'язковою для більшості композитів. Окрім стирання для покращення механічної адгезії, обробка поверхні композитів в основному пов'язана з видаленням роздільних агентів і формуванням поверхонь з більшою енергією, які легше змочуються.

Попередня обробка композитів зазвичай складніша, ніж та, яка використовується для склеювання таких матеріалів, як дерево, метал або

бетон. Наприклад, не рекомендується використовувати лише наждачний папір для шорсткості приклеєної поверхні. Клей, який використовується для з'єднання піску з наждачним папером, має тенденцію зміщуватися та забруднювати поверхню, тим самим зводячи нанівець переваги стирання. Будь-яке стирання наждачним папером слід промити поверхню розчинником (наприклад, ацетоном, метанолом або ізопропіловим спиртом). Необхідно з обережністю підходити до вибору розчинника. Деякі розчинники можуть викликати розтріскування поверхні або інші побічні реакції на певних композитах.

Правильна підготовка поверхні значно впливає на ефективність клейових з'єднань. Результати численних досліджень вказують на багаторазове покращення адгезії, коли була проведена адекватна підготовка поверхні. Переваги підготовки поверхні найбільш очевидні, коли склеювання виконано вчасно.

1.2.6 Процес відбору

Як фізичні, так і хімічні властивості клею та клею впливають на якість з'єднання. Щоб вибрати клей для конкретного застосування з різноманітних доступних епоксидних та уретанових смол, інженер повинен враховувати такі критерії:

1. Основи: виберіть клей, призначений для нанесення на певні основи. Необхідно оцінити такі властивості:

- a. Товщина
- b. Жорсткість
- в. Характеристики поверхні
- d. Розчинність
- д. Теплові властивості

2. Середовище експлуатації: Інженер повинен оцінити очікуване середовище експлуатації, якому піддаватиметься вибраний клей, включаючи вологість, температуру та хімічні впливи. Крім того, якщо це підходить для застосування, розгляньте, чи скріплені частини здатні витримувати занурення у воду чи інші рідини.

3. Очікувані напруги: виберіть клей, який демонструє бажану міцність на відрив, розтягування, міцність на зсув і стиск, а також міцність, необхідні для конкретного застосування.

4. Вимоги до поведження/обробки: перегляньте тип обробки поверхні, необхідний для підготовки субстратів для склеювання, і вирішіть, чи буде клей змішуватись і розподілятися вручну чи автоматично. Також оцініть необхідну в'язкість клейової системи та її відповідність методам змішування та дозування.

5. Життєздатність і затвердіння: враховуйте розмір проекту склеювання та бажану життєздатність, яка буде потрібна для клейової системи. Крім того, оцініть необхідний процес затвердіння для вибраного клею. Система затвердіння при кімнатній температурі може бути кращою, ніж клей, який потребує нагрівання. І навпаки, час виробництва може вимагати прискореного термічного затвердіння.

Як правило, клеї вибираються менш жорсткими, ніж їх зчеплення, щоб можна було мінімізувати концентрацію напруги в з'єднанні.

Рекомендується використовувати стандартизовані анкети, щоб скеровувати дизайнера у виборі відповідних клеїв. Інженер повинен тісно співпрацювати з виробниками клеїв і звертатися за технічною допомогою до їхніх інженерних відділів. Численні ресурси для виробників клеїв доступні у Всесвітній павутині, де багато компаній надають детальну інформацію про продукт на своїх веб-сайтах.

1.2.7 Види клеїв

Основні зчеплення, що використовуються для з'єднання конструкційних композитів, включають епоксидні смоли, поліуретани, ціаноакрилати, метакрилати та розчинні цементи.

Епоксидні

Епоксидні смоли є найбільш часто використовуваним клеєм для з'єднання жорстких конструкційних композитів. Вони демонструють хорошу міцність, універсальність і адгезійні властивості. Епоксидні смоли можуть бути складені або модифіковані за допомогою добавок і наповнювачів для відображення значного діапазону властивостей. Додавання відносно невеликих кількостей еластомерних полімерів може призвести до суттєвого збільшення їх міцності на відрив і удару. Як правило, епоксидні смоли демонструють хорошу стійкість до несприятливих умов навколишнього середовища та мають низьку усадку та характеристики повзучості.

Поліуретани

Поліуретанові клеї вперше були розроблені в Німеччині під час Другої світової війни. Ранні дослідники стверджували, що вони можуть приклеїти «що завгодно до будь-чого». Поліуретани виявляють високу стійкість до ударних навантажень, міцну стійкість до розбухання у мокрому або вологому середовищі та здатність залишатися гнучкими при низьких температурах. Небажані властивості поліуретанів включають обмежену ємність при підвищених температурах, погані характеристики повзучості та погані властивості до старіння. При температурах 150 °F (66 °C) поліуретани можуть втратити до 50% своєї ємності при кімнатній температурі. Використання поліуретанів не рекомендується при робочих температурах вище 248 °F (120 °C). Міцність поліуретанових клеїв залежить від товщини їх склеювальних ліній. Загалом більшість поліуретанових зв'язків мають товщину від 0,002 до 0,006 дюйма (2–6 мілі).

Ціаноакрилати

Ціаноакрилати – це швидкоохлоплювані клеї, які демонструють високу міцність з'єднання між різними клеями. Ціаноакрилати більш відомі як «суперклеї». Незатверділі ціаноакрилати зазвичай є прозорими водянистими рідинами. Ціаноакрилати демонструють дуже низьку в'язкість і мають дуже тонкі лінії зв'язку. Це може призвести до недостатнього покриття та низької міцності зв'язку при використанні між грубими або погано підібраними поверхнями. Ціаноакрилати також дорогі. З'єднання з використанням ціаноакрилатів є крихкими та мають низьку тепло- та вологостійкість. Вони

також схильні до псування під впливом ультрафіолету. Як і епоксидні смоли, ціаноакрилати можна модифікувати. Наповнювачі та добавки можуть бути використані для покращення їх в'язкості та ударних характеристик, старіння та теплових характеристик. В даний час ціаноакрилати мають обмежене спеціальне застосування в цивільному будівництві.

Метакрилати

Метакрилати — це зміцнені акрилати, які нещодавно перетворилися на життєздатні конструкційні клеї. Було розроблено запатентовані суміші метакрилатів, полімерів і модифікаторів ударної зносостійкості, які забезпечують зчеплення, конкурентоспроможні з більш поширеними поліуретанами та епоксидними смолами. Ці метакрилати пропонують деякі явні переваги перед іншими типами клеїв, включаючи значне покращення міцності та в'язкості, швидку швидкість затвердіння та здатність з'єднуватися з різними зчепленнями. У порівнянні з іншими клеями, метакрилати забезпечують чудове проникнення крізь бруд, масло та жир, що зменшує проблеми підготовки поверхні.

Розчинники цементів

Цементи на основі розчинника складаються з полімеризованого компонента, який розчиняють або диспергують в органічному розчиннику або воді. Рідкий розчинник або вода знижує в'язкість полімеризованого компонента, щоб підвищити характеристики змочування клею. Після досягнення змочування рідкий диспергувальний агент необхідно видалити шляхом випаровування, яке іноді називають «випаровуванням». Видалення рідкого диспергуючого агента під час процесу затвердіння призводить до тривалого часу затвердіння та можливості несприятливих ефектів, таких як розтріскування композитного клею.

Цементи-розчинники, які використовуються з термопластами, розчиняють поверхню клею та, по суті, зварюють елементи разом. Цементи на розчиннику широко використовуються для склеювання полівінілхлоридних (ПВХ) труб і вкладишів, цей процес часто називають «зварюванням розчинником». Багато термопластів легше з'єднати цементуванням розчинником, ніж звичайним склеюванням. Успішне використання сольвентних цементів ґрунтується на забезпеченні необхідної кількості розчинника для певного застосування. Занадто багато розчинника може послабити клею біля з'єднання, тоді як занадто мало розчинника призведе до ослабленого, нерозвиненого з'єднання.

1.2.8 Стандартні методи випробування конструкційних клеїв

Як і у випадку з іншими методами з'єднання, випробування є невід'ємною частиною як проектування, так і виготовлення клейових з'єднань. Через широке розмаїття потенційних фізичних і хімічних взаємодій між зчепленням і конструкційним композитом успішні проекти в основному базуються на емпіричному досвіді. Подібним чином важливість підготовки поверхні, техніки нанесення та затвердіння клейових з'єднань спонукає до використання перевірок під час процесу. Виробники конструкційних композитів і клеїв провели масштабні програми тестування, щоб підвищити надійність своєї продукції. Ці програми тестування зазвичай досліджують такі змінні, як підготовка поверхні, методи нанесення, конфігурація з'єднань і умови затвердіння в широкому діапазоні потенційних умов експлуатації. Тому важливо, щоб користувачі дотримувалися рекомендацій виробників.

1.2.9 Поширені причини руйнування клею

Загалом, композитні склеєні з'єднання можуть вийти з ладу одним із двох способів: (1) руйнування клейового (або міжфазного чи з'єднувального) руйнування та (2) руйнування когезійного зв'язку, коли поділ відбувається в самому клеї. В останньому випадку клей залишається на обох поверхнях підкладки, але два предмети відокремлюються.

Коли клей виходить з ладу, основна причина, як правило, потрапляє в одну з чотирьох категорій: (1) недостатня кількість клею, (2) неповне затвердіння, (3) невідповідний клей або (4) низька якість клею. Візуального огляду, як правило, достатньо, щоб визначити, чи прийнятна кількість клею. Оцінка продуктивності з'єднання в залежності від кількості нанесеного клею може визначити, чи потрібно більше клею. Клей, який повністю не затвердів, легко виявити; однак у деяких випадках перевірка клею може не вказувати на неповне лікування.

Порівняння поточних умов лікування з умовами, які використовувалися під час початкового налаштування процесу, може допомогти визначити зміни, які можуть сприяти поганий продуктивності. Наприклад, зниження відносної вологості може бути причиною того, що продукт, що затверджується вологою, не пройшов випробування на лінії, яке він пройшов раніше. Несправна піч або джерело світла може видавати недостатньо енергії для завершення затвердіння клею.

У деяких випадках спочатку обраний клей виявляється невідповідним для застосування. Іноді з'являються нові вимоги до продуктивності, або може змінитися визначення прийнятного з'єднання. Іноді суворість виробництва виявляється занадто важкою для клею, який добре працював на стадії прототипу. Певна кількість клею також може виявитися поганою; таким чином, перевірка терміну придатності клею та тестування з'єднання за допомогою свіжої партії допоможе визначити якість підозрілої партії.

Цінну інформацію можна отримати, перевіривши ефективність несправного клею та перевіривши запаси цієї партії виробника клею на відповідність оригінальним виробничим специфікаціям клею. Якщо несправний матеріал показує значно гірші результати, ніж запаси виробника клею, що залишилися, то, ймовірно, клей зберігався неналежним чином. Якщо обидва зразки відповідають виробничим специфікаціям виробника клею, ці специфікації можуть бути занадто загальними для даного процесу, або процес може залежати від характеристики, яка не була оцінена як частина специфікацій клею.

1.3 Комбіновані з'єднання

У комбінованих з'єднаннях використовуються як клеї, так і механічні кріплення. Такий спосіб з'єднання композитів дозволяє забезпечити з'єднанню більшу ємність і надійність. У комбінованих з'єднаннях властива міцність компонентів підвищується, щоб отримати з'єднання, яке демонструє значно покращені характеристики. Однак інженеру-будівельнику має бути зрозуміло, що комбінована міцність з'єднання не є алгебраїчною сумою міцності окремих скріплених і болтових з'єднань. Болтові/скріплені з'єднання мають більшу міцність, жорсткість і довговічність у порівнянні з з'єднаннями, скріпленими клеєм. Однак це особливо актуально для з'єднань із застосуванням клею з нижчим модулем, що забезпечує розподіл навантаження між клеєм і болтом. Аналіз і проектування комбінованих з'єднань дуже складні і вимагають використання нелінійних методів. Передача навантаження в болтових/скріплених композитних з'єднаннях ускладнена через різницю в жорсткості альтернативних шляхів навантаження.

Деякі деталі з'єднання перевершують інші, особливо для композитів. У деяких випадках, таких як тривалі навантаження на термопластичні композити з низьким модулем, лише механічне кріплення є недоцільним. Концентрації напруги, що відображаються механічним кріпленням, можуть сприяти вираженим деформаціям у матеріалах, чутливих до повзучості.

Поліпшення роботи з'єднань можна досягти за допомогою різноманітних механізмів, якщо зрозуміти загальну поведінку різних з'єднань і, меншою мірою, їх ефективність у різних типах композитних структур.

Механічно скріплені, зварні (для термопластичних композитів) і скріплені зчепленням з'єднання мають унікальні переваги та характеристики. З одного боку, механічні кріплення відносно прості в установці, але вони викликають значні коефіцієнти концентрації напруг. З іншого боку, зварювання та клейові зв'язки для термопластичних композитних з'єднань забезпечують більший розподіл навантаження в з'єднанні, але також вимагають більшої кваліфікації.

Хоча з'єднання комбінованого типу, зокрема механічні клейові, зазвичай використовуються в конструкціях, опублікована інформація на цю тему обмежена.

1.3.1 Огляд пов'язаної роботи

Характеристика	Механічний	Клей	Зварні
Концентрація напруги в суглобі	Високий	Середній	Середній
Співвідношення міцності до ваги	Низький	Середній	Середній
Використання з нежорсткими полімерами	Потрібні вкладиші	Так	Так
Ущільнення в зборі (водонепроникність)	Ні	Так	Так
Теплова або електроізоляція	Ні	Так	Так
Притягальна сила (рівні шви)	Погано	Добре	Добре
Витривалість до навантаження	Погано	Добре	Добре
Чутливий до шкірного навантаження	Ні	Так	Ні
Розбирання	Можливо	Неможливо	Неможливо
Огляд	Легко	Складно	Складно
Необхідні навички від виробника	Низький	Високий	Високий
Потрібне тепло або тиск	Ні	Так	Так
Витрати на інструменти	Низький	Високий	Високий
Час досягти остаточної сили	Миттєвий	Довгий	Короткий

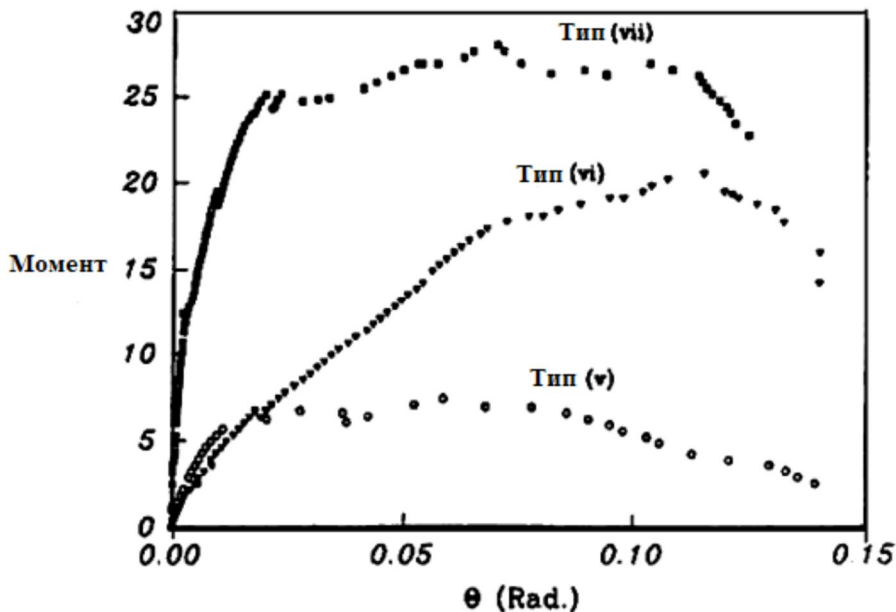
Малюнок 1.3.1 Порівняння механічних, клейових і зварних з'єднань

Харт-Сміт обговорив структурну поведінку склеєних/болтових композитних з'єднань. У цих роботах представлено різні аспекти поєднання клейового з'єднання та механічного кріплення для волокнистих композитних конструкцій. Було показано, що комбінація склеювання та болтового кріплення є особливо корисною для ремонту та запобігання поширенню пошкоджень у композитних конструкціях. Ранні дослідження Вінсона показали, що комбіновані болтові та клейові композитні з'єднання були на 50% міцнішими, ніж подібні з'єднання, що склалися лише з болтів. Експериментальні значення міцності для комбінованих болтових/скріплених з'єднань також були помітно вищими, ніж для з'єднань, скріплених лише клеєм. Фу та Маллік оцінили, як експериментально, так і чисельно, втомну поведінку комбінованих з'єднань для композитних композитів для листового формування та композитів, отриманих під тиском за допомогою структурної реакції. У цьому дослідженні були проведені статичні та втомні експерименти з твердими круглими шайбами, а також з тонкими та товстими квадратними шайбами. Основною метою цього дослідження було оцінити вплив типу та геометрії шайби на продуктивність болтових/скріплених з'єднань. Результати випробувань показали, що наявність високих напруг відриву на кінцях клейових і склеєних з'єднань є основним ініціатором руйнування.

Було зроблено висновок, що квадратні шайби є більш ефективними для запобігання або затримки руйнування через розрив волокна порівняно з круглою шайбою, яка не забезпечує бокового затискання у зовнішніх кутах

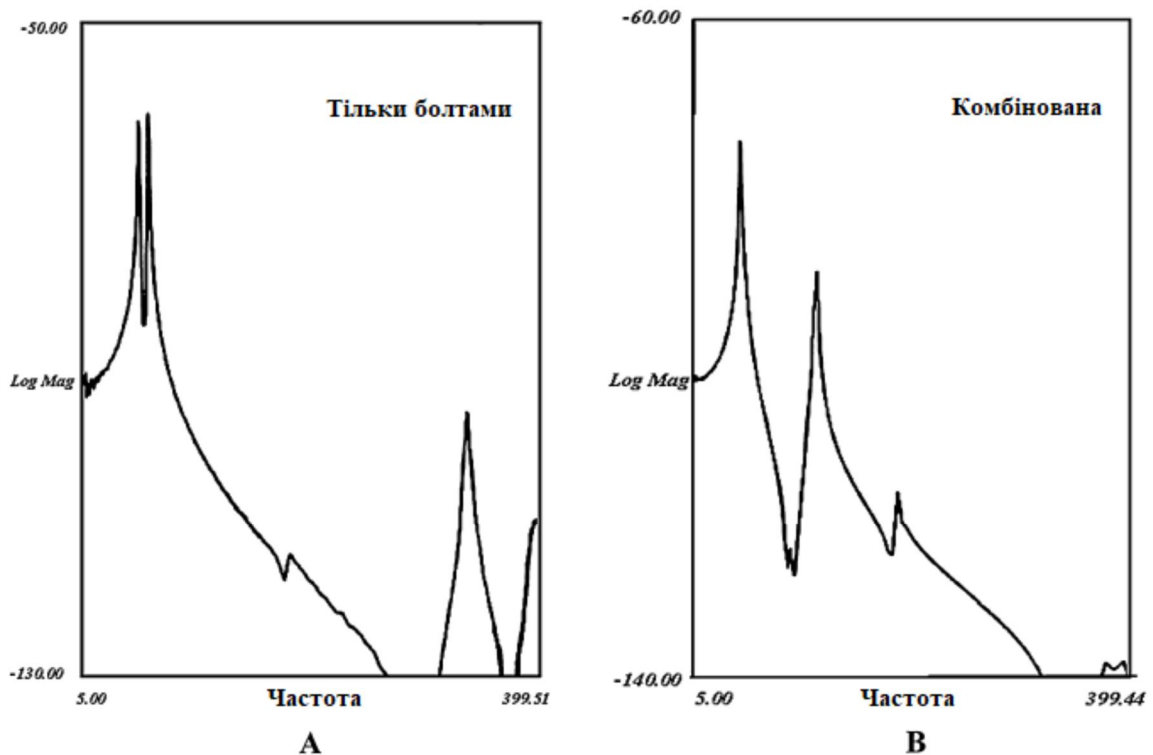
нахлесткових кінців. Келлі досліджував квазістатичну міцність і довговічність гібридних (з'єднаних/болтових) композитних з'єднань з одним нахлестом. Результати цього дослідження засвідчили наявність трьох окремих етапів у втомному ресурсі гібридних з'єднань, де клей, болт і їх комбінація сприяли передачі навантаження. Було також повідомлено, що у гібридних з'єднаннях, де болт передав значну частину навантаження, було виявлено, що виникнення втомної тріщини відбувається пізніше. Результати цього дослідження також показали, що ступінь руйнування з'єднань залежить від співвідношення між міцністю гібридного з'єднання та несучою міцністю ламінату.

Результати повномасштабних квазістатичних і циклічних випробувань для пултрузійних рамних з'єднань показали, що значне збільшення як обертальної жорсткості, так і міцності досягається при використанні як клейових, так і механічних кріплень. Це очевидно з експериментальних кривих момент-обертання, представлених і показано на мал.1.3.2. У цьому ж дослідженні також оцінювався динамічний ефект від використання комбінації клеїв і механічних кріплень. Виходячи з експериментального аналізу частотної характеристики (див. мал. 1.3.3), болтові з'єднання балки з пластиком пластику до колони є відносно гнучкими порівняно з комбінованою деталлю з'єднання. Отже, амортизаційна здатність болтових з'єднань, у яких використовуються тертя PFRP, різьбові стрижні та гайки, є вищою, ніж комбіновані з'єднувальні деталі, у яких використовуються як механічні кріплення, так і клеї.



Малюнок 1.3.2 Криві момент–обертання для різних з'єднань рами PFRP. Тип v, тільки болтове (подібне до сталі); тип vi, тільки болтовий

(універсальний роз'єм; UC); і тип vii, болтове/скріплене (комбіноване) з'єднання UC.



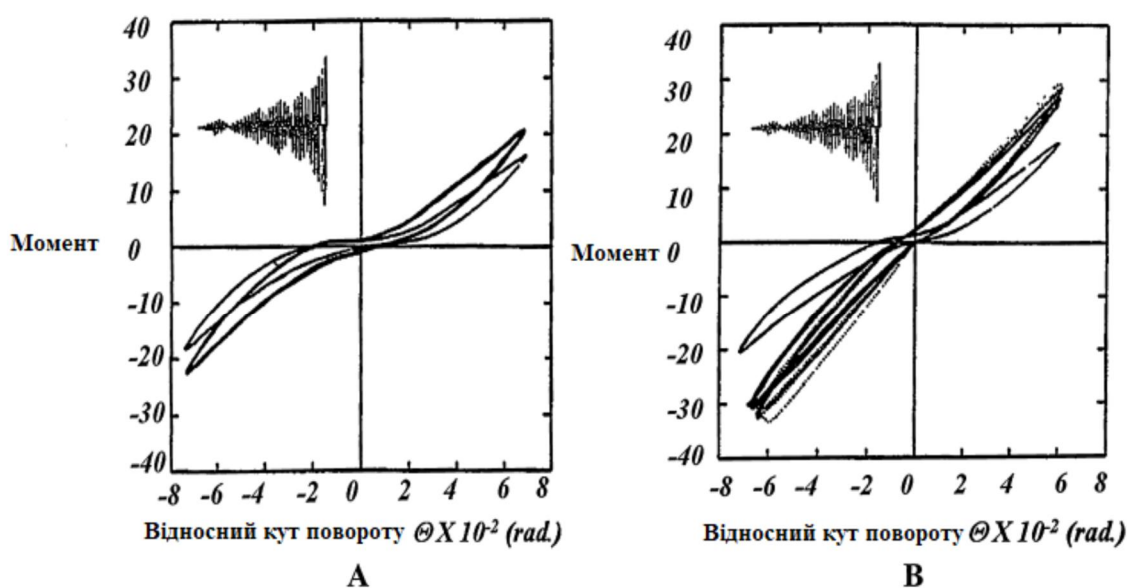
Малюнок 1.3.3 Діаграми частотної характеристики для болтових (А) і комбінованих (В) з'єднань балки з рамою.

Мосаллам повідомив, що низька втомна поведінка комбінованих болтових/скріплених композитних з'єднань була більш задовільною, ніж деталей з'єднання лише болтами. У квазістатичному режимі навантаження експериментальні результати в цьому дослідженні показали, що гранична здатність моменту комбінованої деталі з'єднання була приблизно на 33% вищою (режим закриття) і на 43% вищою (режим розмикання), ніж значення граничної здатності моменту, отримані для болтових -тільки деталі підключення. Крім того, було досягнуто збільшення обертальної жорсткості з'єднання приблизно на 81%, коли використовувалися як клеї, так і механічні кріплення (див. мал. 1.3.4).

1.3.2 Переваги та застосування комбінованих з'єднань

Комбіновані механічно-клеєві з'єднання демонструють наступні переваги перед з'єднаннями, які використовують тільки механічні кріплення або клей:

1. Вищі загальні потужності
2. Більша стійкість до екологічного та термічного погіршення
3. Менше схильний до відшарування або розщеплення
4. Покращений розподіл навантаження на суглоби
5. Покращені характеристики втоми та удару
6. Підвищена жорсткість
7. Зменшення ефекту відшарування та розколу в ексцентричних з'єднаннях завдяки наявності механічних кріплень у поєднанні зі структурними зчепленнями
8. Вищі коефіцієнти безпеки



Малюнок 1.3.4 Криві гістерезису для болтових (А) і болтових/склеюваних (В) зовнішніх деталей з'єднання балки.

Склеєні/болтові з'єднання особливо корисні для з'єднання композитних ламінатів. Загальновизнано, що цілісність з'єднань механічного кріплення залежить від міцності місцевого ламінату. Таким же чином, цілісність з'єднань, з'єднаних адгезійним способом, в основному залежить від локальної

міжшарової міцності на зсув. Склеєні/болтові композитні з'єднання також пропонують деякі переваги під час монтажу. Механічні кріплення можуть створювати контактний тиск, необхідний для затвердіння клею. Подібним чином клеї можуть служити засобом підтримки вирівнювання механічних кріплень. Нижче наведено деякі практичні застосування склеєних/болтових з'єднань:

1. Застосування клею в поєднанні з механічним кріпленням може надати з'єднанню додаткову жорсткість. Використання комбінованого клейко-болтового з'єднання може забезпечити більш жорстке, менш складне з'єднання, завдяки чому забезпечується підвищена пропускну здатність і більш ефективна загальна конструкція.

2. Підсилення наявного болтового з'єднання в отворах для кріпильних елементів за допомогою клею може збільшити пропускну здатність механічно закріпленого з'єднання до 55%.

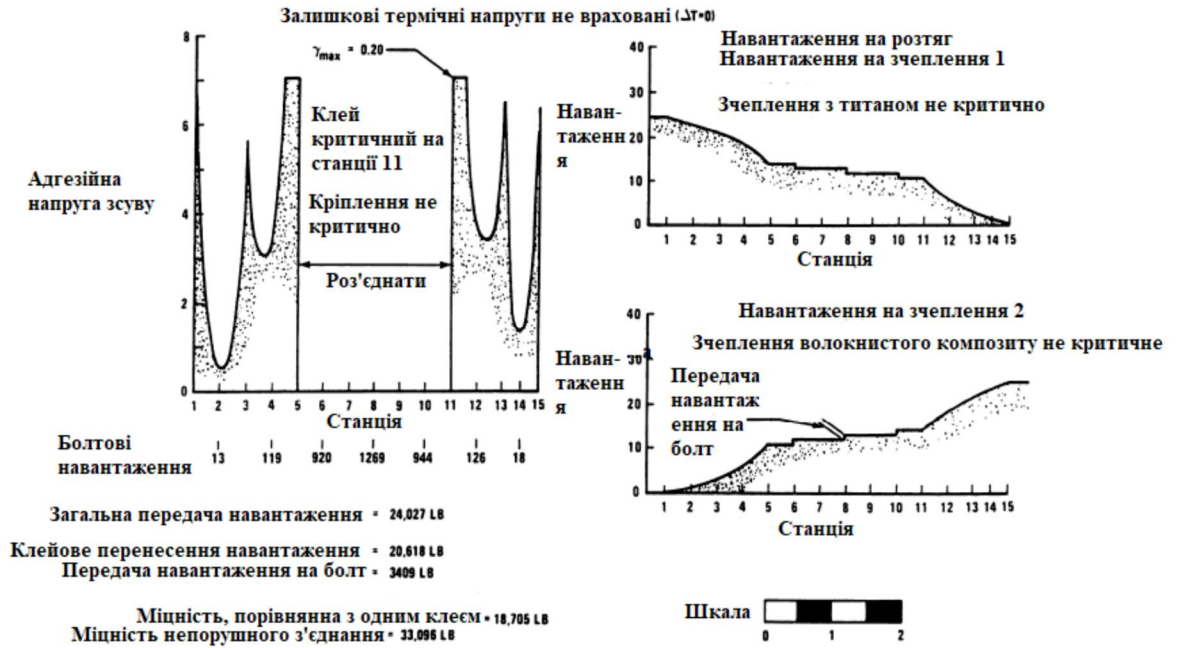
3. У гнучких мембранах, таких як одношарова покрівля, механічні кріплення забезпечують вторинний засіб кріплення, на додаток до клеїв, який менш схильний до погіршення навколишнього середовища. Механічними кріпленнями також служать лати або армуючі смуги.

4. У деяких випадках ремонту болти замінюються на локально дефектні або пошкоджені з'єднання. У цих випадках болти, вставлені через пошкоджені або дефектні ділянки з'єднання в клейових з'єднаннях, не тільки успішно витримують існуючі навантаження, але й допомагають зменшити будь-які суміжні критичні місця в клейовому з'єднанні, які можуть виникнути в результаті пошкодження, шляхом перенаправлення напруг від цих зон до болта (див. мал. 1.3.5).

5. Отже, клей, що залишився, може бути напружений сильніше, перш ніж станеться остаточна несправність. Механічні кріпильні елементи служать, перш за все, для зменшення критичності пікової деформації, що розвивається в зчепленні поруч із розривом або місцевою пошкодженою ділянкою. У результаті клей, що залишився, відчуватиме більше навантаження, ніж без цих болтів. Таким чином, клей може витримувати більший рівень навантаження, поки не буде досягнуто критичних напружень у зчепленнях. Детальніше про це застосування описано в Харт-Сміті.

6. Комбіноване використання клеїв і механічних кріплень забезпечує ефективний засіб для запобігання поширенню пошкоджень. Одним із прикладів є випадок клейового з'єднання різних жорстких матеріалів, коли один з них розривається або раптово обривається. Це також може виникнути під час розриву ребра жорсткості або в металевих конструкціях, скріплених

зчепленням, де в одному елементі утворилася тріщина, що почалася в отворі під болт. Використання болтів у поєднанні з існуючим зчепленням сприятиме сприйняттю значного навантаження, що призведе до зниження інтенсивності піку розподілу напруги зсуву зчеплення (на кінчику роз'єднання клею). У результаті будь-яке подальше поширення пошкоджень буде усунуто.



Малюнок 1.3.5 Передача навантаження через пошкоджене (деформоване) склеєне з'єднання, укріплене болтами

7. Додавання болтів призводить до створення безпечних шляхів навантаження в скріплених з'єднаннях. Наприклад, залишкова міцність з'єднання, обмежується міцністю композитного ламінату через зменшений перетин у отворі під болт. Як показано на малюнку, будь-який розрив, за прогнозами, відбуватиметься в смолі поруч із лінією з'єднання клею, а не в самому клеї. Використання механічних кріплень у цьому випадку було б дуже ефективним для зупинки подальших пошкоджень, які інакше поширювалися б по всій композитній структурі. Таким чином, болти забезпечують безпечні шляхи навантаження в скріплених з'єднаннях. Для більш тонких композитних елементів і, на відміну від попереднього випадку для більш товстих елементів, клейове з'єднання фактично забезпечує надійний механізм для болтів. У цьому випадку з'єднання є найменш імовірним джерелом збою. Таким чином, додавання клею до механічно скріпленого з'єднання забезпечить безпечний шлях навантаження, який захистить композитний ламінат від розриву вздовж лінії болтів.

Розділ 2 Особливості роботи шаруватих оболонок з композиційних матеріалів під дією внутрішнього тиску

2.1 Проектні підходи

Метою проектування є досягнення прийнятної ймовірності того, що проєктована конструкція не стане непридатною для використання, для якого вона потрібна, тобто вона не досягне граничного стану протягом проектного терміну служби.

Існує два широко використовувані підходи до проектування: (1) підхід до розрахунку допустимого напруження і (2) підхід до розрахунку коефіцієнта навантаження та опору.

2.1.1 Розрахунок допустимих напруг (РДН)

Цей підхід, який називається (РДН) і також відомий як проектування робочих напруг (ПРН), десятиліттями використовувався інженерами-будівельниками через його простоту. Однак протягом останніх 30 років метод РДН / ПРН поступово був замінений новим підходом (додатково описаний у 2.1.2), який базується на граничних станах, за винятком проектування граничного стану відхилення.

У підході до проектування РДН єдиний коефіцієнт міцності використовується для врахування мінливості матеріалів, впливу навантаження та міцності елементів, а також тривалого погіршення міцності елемента конструкції. Отже, конструкція базується на допустимому напруженні, а не на граничній міцності матеріалу. Іншими словами, цей підхід об'єднує сукупність ефектів зміни навантаження та характеристик елементів без розрізнення цих двох ефектів або зважування внеску кожного ефекту в загальну надійність конструктивного елемента (наприклад, з'єднань і з'єднань рами).

Підхід РДН вимагає наступного:

Розрахункова напруга \leq Сума допустимих напружень навантажень \leq Опір (сила члена \div коефіцієнт безпеки), або

$$\sum Q_i = \frac{R}{SF} \quad (2.1)$$

де:

Q_i = сума очікуваного навантаження

R = опір або сила члена

SF = фактор безпеки.

2.1.2 Підхід до проектування коефіцієнта навантаження та опору

Підхід до проектування був розроблений для кращої окремої оцінки впливу навантажень (напружень), що застосовуються до конструкції, та опору (міцності) елементів. Таким чином, метою розробки протоколу проектування було вдосконалення існуючої стратегії проектування (РДН або ПРН), щоб краще оцінити як вплив навантажень, що застосовуються до конструкції, так і очікувану міцність (опір або місткість) цього конкретного елемента або конструкції. система. Підхід полягає у збереженні такої нерівності:

Сума ефектів навантаження \leq Факторний опір навантаження, або

$$\sum \gamma_i Q_i \leq \varphi R^* \quad (2.2)$$

та

$$R^* = R * C_1 * C_2 * C_3 * \dots * C_n \quad (2.3)$$

де:

γ_i = коефіцієнт навантаження для врахування відхилень, невизначеностей, пов'язаних із навантаженням, і мінливості або в кодексах, що мають юрисдикцію щодо проекту. Для заданого прикладеного навантаження коефіцієнт навантаження коливається від 0,2 до 1,6 залежно від комбінації навантажень.

Q = номінальне навантаження, яке також вказано в кодах, що мають юрисдикцію щодо проекту.

R = еталонний опір (або міцність), який відноситься до матеріалу або жорсткості з'єднання за стандартних еталонних умов експлуатації, включаючи конкретні значення тривалості навантаження та умов навколишнього середовища, таких як вологість і температура.

C_1, \dots, C_n = коефіцієнти коригування для врахування умов поза стандартними умовами, таких як вплив навколишнього середовища (наприклад, екстремальні температури, вологість, цикли заморожування–відтавання), тривалість навантаження та інші фактори, які можуть впливати на міцність і жорсткість елемента під час термін служби.

R^* = скоригований опір (або міцність), який є зменшеним значенням опору елемента через умови, що виходять за межі стандартних еталонних умов, наприклад вплив навколишнього середовища (наприклад, екстремальні температури, вологість, цикли заморожування–розморожування), тривалість навантаження та інші

фактори що може вплинути на міцність і жорсткість елемента протягом терміну служби.

Для нових матеріалів, таких як композити, акцент робиться на визначенні відповідних методів для розрахунку R і вказівці значень ϕ , які представляють рівень впевненості в досягненні цих рівнів опору для кожного типу застосування. Крім того, необхідні методи розрахунку Q_i (наприклад, напруга в PFRP або прогинів).

2.1.3 Розрахункові навантаження

Найбільш прийнятним стандартним документом щодо розрахункових навантажень для цивільного будівництва в Сполучених Штатах є Мінімальні розрахункові навантаження для будівель та інших споруд, ASCE/SEI 7-10 (ASCE 2010). Цей документ представляє процедури визначення мінімальних навантажень і комбінацій навантажень для будівель та інших типів конструкцій. Іншим визнаним галузевим документом для проектування навантажень і опорів, пов'язаних зі сталевими конструкціями, є Посібник зі сталевих конструкцій AISC, 13-е видання (AISC 2006). Для композитів можуть знадобитися додаткові процедури для врахування таких фізичних і механічних властивостей, як залежні від часу фактори, температура склування тощо. Цей підхід був прийнятий у розробці специфікацій LRFD 1995 ANSI/AF&PA для дерев'яних конструкцій, які були оновлені в 2005 році (AWD 2006). Це також було основною проблемою комітету зі стандартів стеків із армованого скловолокном пластику, мета якого полягала в створенні стандарту для проектування, виготовлення, монтажу та обслуговування окремо стоячих, самонесучих, стійких до вітру стеків із FRP.

2.1.4 Фактори безпеки

Що стосується інших конструкційних матеріалів, то при проектуванні композитних з'єднань слід враховувати фактор безпеки. Коефіцієнт міцності (FS) визначається як «відношення гранично допустимої напруги до максимальної робочої напруги»:

$$FS = \frac{\sigma_u}{\sigma_a} \quad (2.4)$$

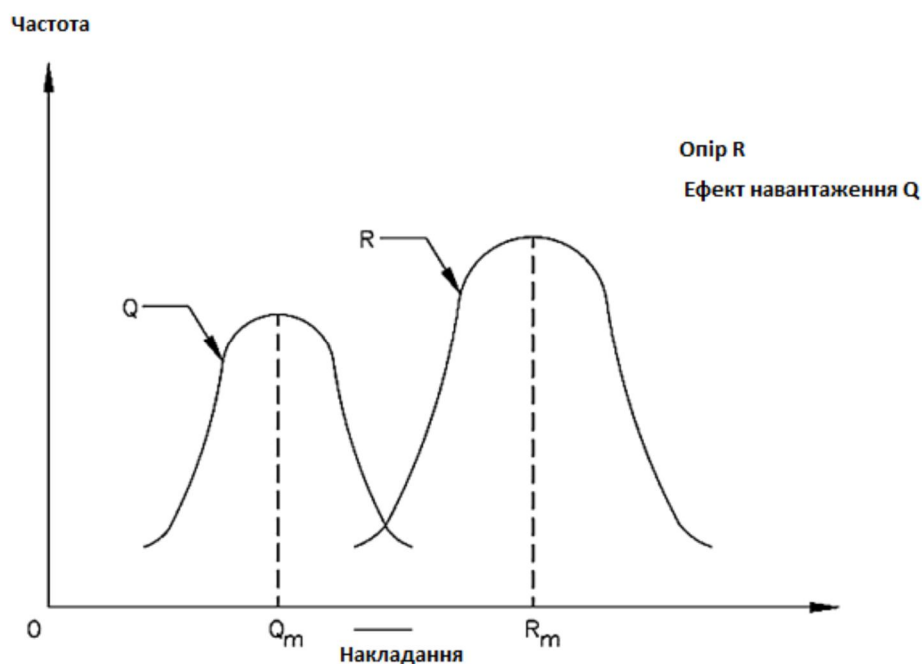
де:

FS = коефіцієнт безпеки

σ_u = граничне напруження, psi (МПа)

σ_a = допустиме напруження, psi (МПа).

Для односпрямованих пултрузійних композитів рекомендований коефіцієнт міцності від 3 до 4. Однак слід зазначити, що ці рекомендовані коефіцієнти безпеки не включають вплив навколишнього середовища і в основному стосуються нормальних умов навколишнього середовища та навантаження. Результати польового дослідження, проведеного Мосалламом, не тільки послужили основою для попереднього стандартного документа для композитних конструкцій, але також показали, що передчасне руйнування пултрузійних однонаправлених з'єднань відбувалося в суворих умовах, коли фактори безпеки навколишнього середовища були не розглядається.



Малюнок 2.1.1 Функції щільності ймовірності для навантаження та опору

2.1.5 Гарантовані механічні властивості

Механічні властивості композитних профілів FRFR повинні забезпечуватися пультрудером. Пультрудери повинні повідомляти так звані «гарантовані» значення. Наприклад, гарантована гранична міцність на зсув визначається як «середнє значення міцності зразка (випробуваного згідно з протоколами) мінус потрійне стандартне відхилення, тобто:

$$\tau_u^{gr} = \tau_u^{mean} - 3S \quad (2.5)$$

де:

τ_u^{gr} = гарантована гранична міцність на зріз

τ_u^{mean} = середня межа міцності на зсув

S = стандартне відхилення.

Ці гарантовані властивості забезпечують 99,87% ймовірність того, що вказані значення перевищено. Пультрудер повинен надати опис методу(ів), використаного(их) для отримання гарантованих властивостей. Детальніше обговорення цієї теми представлено в 2.1.6

2.1.6 Пропонована філософія

В даний час не існує єдиного підходу до проектування пултрузійних композитних елементів і з'єднань. Уніфікація підходу була неможливою через обмежену експериментальну інформацію щодо механічної поведінки пултрузійних композитних елементів і з'єднань. Натомість було розроблено різноманітні підходи. Наприклад, у Кодексі проектування EUROCOMP і Довіднику, опублікованому в 1996 році, прийнятий підхід LRFD. У Сполучених Штатах кілька дослідників прийняли той самий підхід, використовуючи припущені коефіцієнти навантаження при проектуванні пултрузійних елементів і з'єднань.

Запропонована філософія, описана в цьому документі, призначена для аналізу, проектування та оцінки конструкцій, виготовлених із полімерних композитів, армованих суцільним волокном. Окрім механічних, термічних і хвильових властивостей композитів, фізичне та хімічне старіння та в'язкопружні реакції відіграють важливу роль у розробці композитних структурних систем. Багато факторів безпеки та стійкості повинні бути включені в проект, щоб врахувати довгострокову роботу, комбінації навантажень, міжшаровий зсув і краєві ефекти, локальний удар і пошкодження, гальванічну корозію, горючість і багато інших умов.

Конструкція повинна бути спроектована таким чином, щоб уникнути катастрофічного руйнування під час удару або пожежі. Крім того, для структурних форм або систем потенційна несправність повинна бути обмежена відповідним вибором (1) зменшення небезпеки (наприклад, проектування узбіччя для перенаправлення транспортного засобу, який зіткнувся з огорожею); (2) проектування для високого ступеня невизначеності; (3) вибір або проектування поперечного перерізу для поглинання великих ударів; і (4) включення відповідних матеріалів, активного та/або пасивного керування тощо.

2.1.7 Матеріальна нелінійність

Якщо використовується нееластичний аналіз (нелінійність матеріалу), необхідно провести повторний аналіз реакції на руйнування після першого шару структурної системи після встановлення передбачуваних механізмів відмови та режимів відмови. Аналіз повинен визначити, чи є способом руйнування вигин, зсув, прогин тощо в структурних компонентах. Якщо розробник вирішить, він або вона повинні продовжити формулювання попередньо визначеного механізму непружного руйнування для контролю руйнування. Такий підхід може бути дуже складним і вимагати глибокого розуміння механіки композитних матеріалів і ламінатів.

2.1.8 Геометрична нелінійність

Геометричні нелінійності повинні бути враховані в аналізі, якщо деформації призводять до змін у структурній конфігурації (наприклад, кутові зміни між балками та колонами). Геометричні моделі нелінійності повинні базуватися на даних випробувань конструкційних елементів і з'єднань повинні включати початкову викривленість компонентів, що може бути дуже важливим при аналізі стабільності. Для струнких компонентів в'язкопружні характеристики необхідно враховувати в аналізі на додаток до взаємодії різних сил в елементі. У нелінійному аналізі повинні використовуватися лише факторизовані навантаження, а в нелінійному діапазоні не застосовуватися суперпозиція силових впливів.

2.1.9 Граничні стани

Щоб запобігти пластичному руйнуванню, проект повинен враховувати придатність до експлуатації, міцність, стабільність і граничні стани екстремальних подій компонента та/або системи. Ці граничні стани такі:

- Граничний стан експлуатаційної придатності: межі прогину, межі обертання, межі розтріскування, межі вібрації, межі нестабільності та межі реагування людини повинні бути встановлені у спосіб, подібний до співвідношення прольоту до глибини, товщини фланця, перетинки до ширини або - коефіцієнти глибини тощо.

- Граничний стан міцності: факторний опір повинен бути добутком номінального опору, визначеного, як зазначено вище; Коефіцієнти опору змінюються для гнучкості, зсуву, стиснення паралельно і перпендикулярно одиницям і розтягнення паралельно одиницям. Як і в конструкціях елементів конструкції зі звичайних матеріалів, для певних комбінацій навантажень коефіцієнт опору слід помножити на 0,75.

- Граничний стан стійкості: конструктивний компонент повинен бути перевірений на стійкість до ковзання, перекидання, підйому, а також локального та загального вигину.

- Граничний стан екстремальної події: для граничного стану екстремальної події коефіцієнт опору приймається рівним 1,0.

2.2 Аналіз та проектування клеєвих композиційних з'єднань

Адгезивне з'єднання є найбільш природним способом з'єднання елементів з армованого волокнами полімерного матеріалу (FRP). Це пояснюється тим, що матриця в композиті сама по собі є полімером і діє як адгезив для передачі міжшарових зсувних сил, зберігаючи при цьому геометрію форми недоторканою. Клейові з'єднання мають високу конструкційну ефективність і є ресурсом для економії ваги конструкції. Крім того, потенціал для усунення концентрації напруги не може бути досягнутий за допомогою механічно скріплених з'єднань. Однак існують обмеження щодо практичного використання клейових з'єднань. Наприклад, використання крихких клеїв викликає катастрофічні збої. У випадках, коли використовуються пластичні клеї, з'єднання може зіткнутися з проблемами повзучості. Жорсткість зчеплення може впливати на інтенсивність напружень відриву в з'єднанні.

Зазвичай клей є слабкою ланкою в з'єднанні. Тим не менш, було докладено зусиль, щоб гарантувати, що пошкодження адгезиву передують пошкодженню адгезиву. Це пояснюється тим, що руйнування адгезиву можна контролювати, тоді як руйнування адгезиву спричинене переважною смолою. Міцність адгезії є функцією відсотка порожнеч, варіацій товщини, впливу навколишнього середовища, варіацій обробки, недоліків у підготовці поверхні та інших факторів, які не завжди належним чином контролюються. Практичне використання клейових з'єднань було обмеженим через відсутність точних методів аналізу, надійних і релевантних властивостей матеріалів і знань про довгострокову поведінку з'єднань. Як обговорювалося в розділі 4, для успішного клейового з'єднання потрібен ретельно розроблений процес виготовлення, який забезпечує наступне:

- Правильний підбір клею
- Правильна попередня обробка поверхні
- Належні властивості міцності та пластичності обраного клею
- Адекватна товщина
- Належні умови контролю тиску затискання, температури та вологості для сприяння затвердінню та розвитку міцності клеїв (ASCE 1984)
- Хімічна та фізична сумісність клею з адгезивами та робочим середовищем. Клеї повинні бути придатними для робочого температурного діапазону, хімічного та ультрафіолетового (УФ) впливу та тривалості навантаження. Наприклад, жорстка епоксидна смола забезпечує високу міцність при кімнатній температурі, але практично не має міцності при $-10\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($-23\text{ }^{\circ}\text{C}$) або $350\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($177\text{ }^{\circ}\text{C}$).

2.2.1 Типи напружених станів, що розвиваються в композиційних з'єднаннях

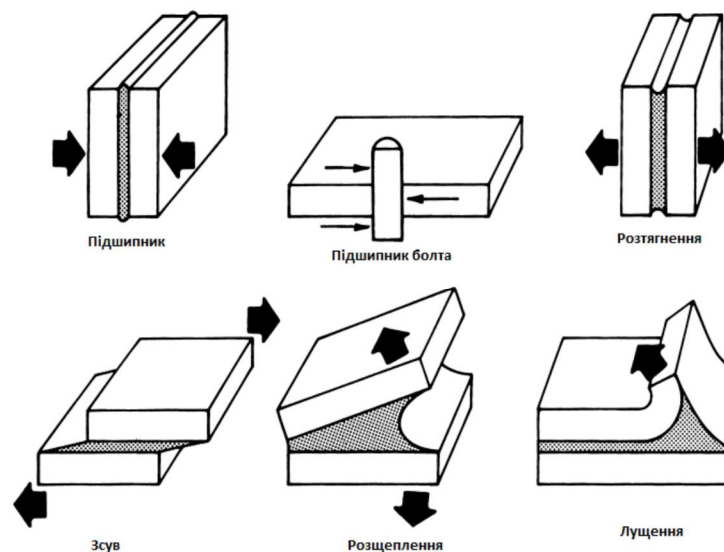
Композитні з'єднання, скріплені адгезивом, повинні бути сконструйовані таким чином, щоб шари клею зазнавали першочергових навантажень при зсуві або стисненні. Розробнику слід уникати або ретельно оцінювати склеєні з'єднання, які зазнають високого прямого натягу, сил розколювання та відриву. Малюнок 2.2.1 ілюструє різні умови напруги в з'єднанні.

2.2.2 Конфігурації з'єднань

Малюнок 2.2.1 представляють короткий перелік поширених конфігурацій з'єднань для композитних конструкцій. Нижче наведено найпоширеніші конфігурації:

1. Клеєне з'єднання в один нахлест
2. Однопланкове з'єднання
3. З'єднання внахлест
4. Подвійне ременне з'єднання
5. Східчасто-нахлестковий з'єднання
6. Косичне з'єднання

Міцність різних конфігурацій з'єднань як функція товщини з'єднання, яка пропорційна інтенсивності розрахункового навантаження на з'єднання. На цьому малюнку кожна крива представляє найкращу міцність для кожної конфігурації з'єднання. Діагональна лінія, що проходить через початок координат, представляє міцність зчеплення поза зоною з'єднання.

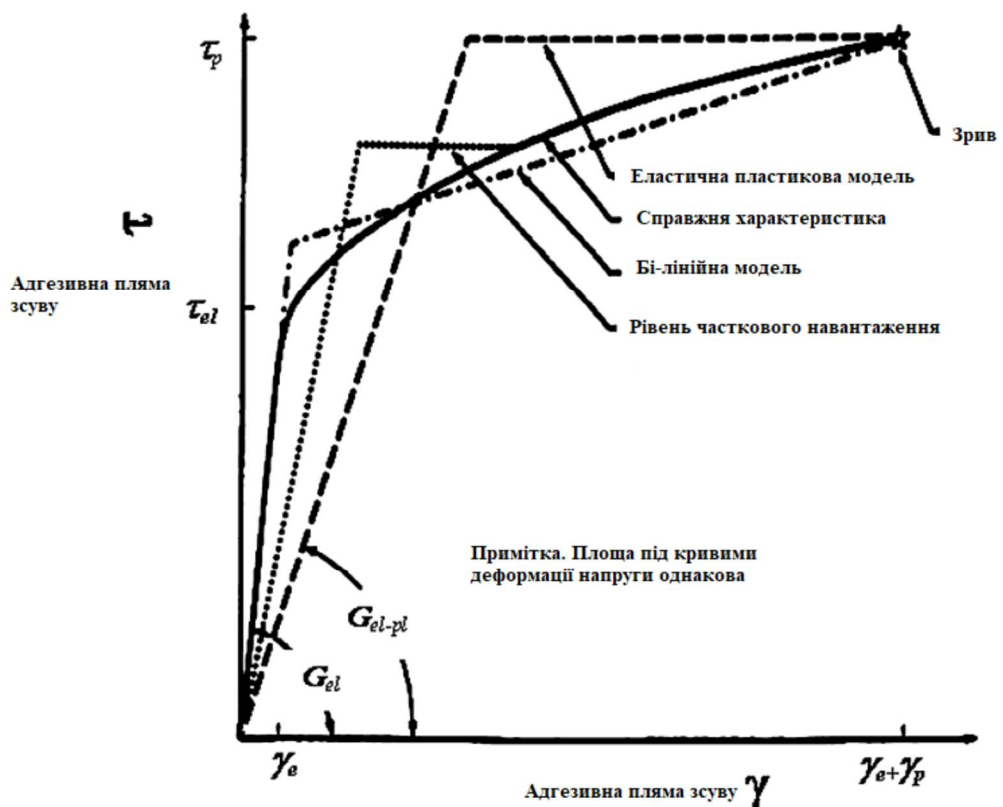


Малюнок 2.2.1 Структурна поведінка композитних з'єднань.

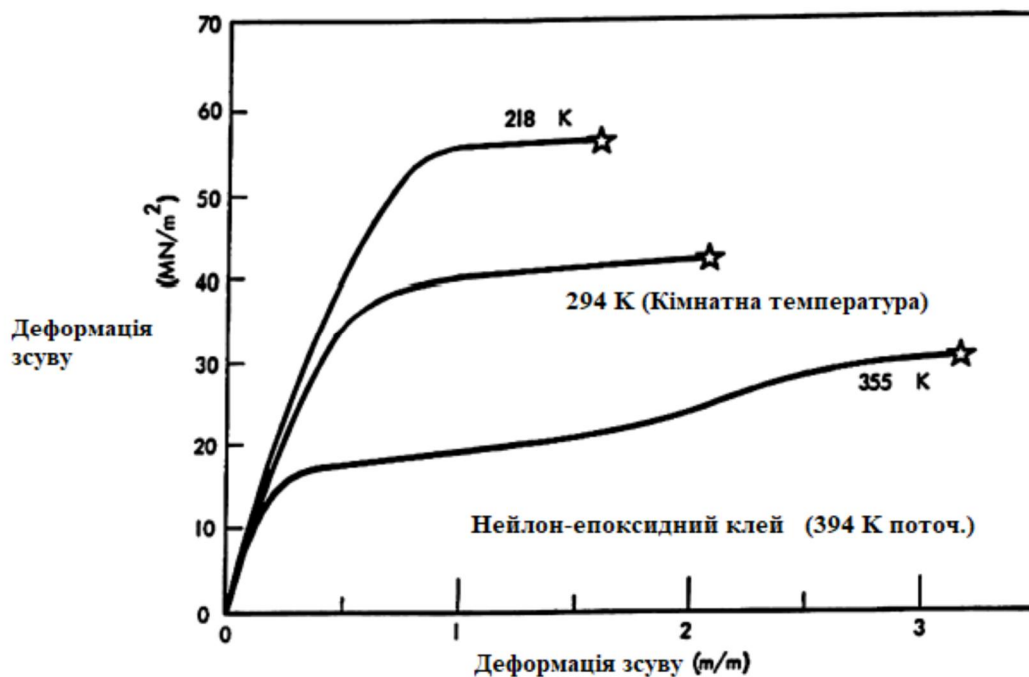
2.2.3 Характеристика напруження-деформації адгезії

Щоб точно передбачити несправність клейових з'єднань, при проектуванні слід враховувати нелінійну адгезивну поведінку. Харт Сміт застосував двопрямую (білінійну) характеристику адгезиву для різних геометрій з'єднань. Критерій руйнування адгезії при зсуві однозначно визначається енергією деформації зсуву адгезії на одиницю площі зв'язку, незалежно від індивідуальних характеристик, які сприяють цій енергії деформації. Енергія нелінійної деформації часто в 100 разів перевищує лінійне значення, яке представляло б десятикратне збільшення прогнозованої міцності з'єднання.

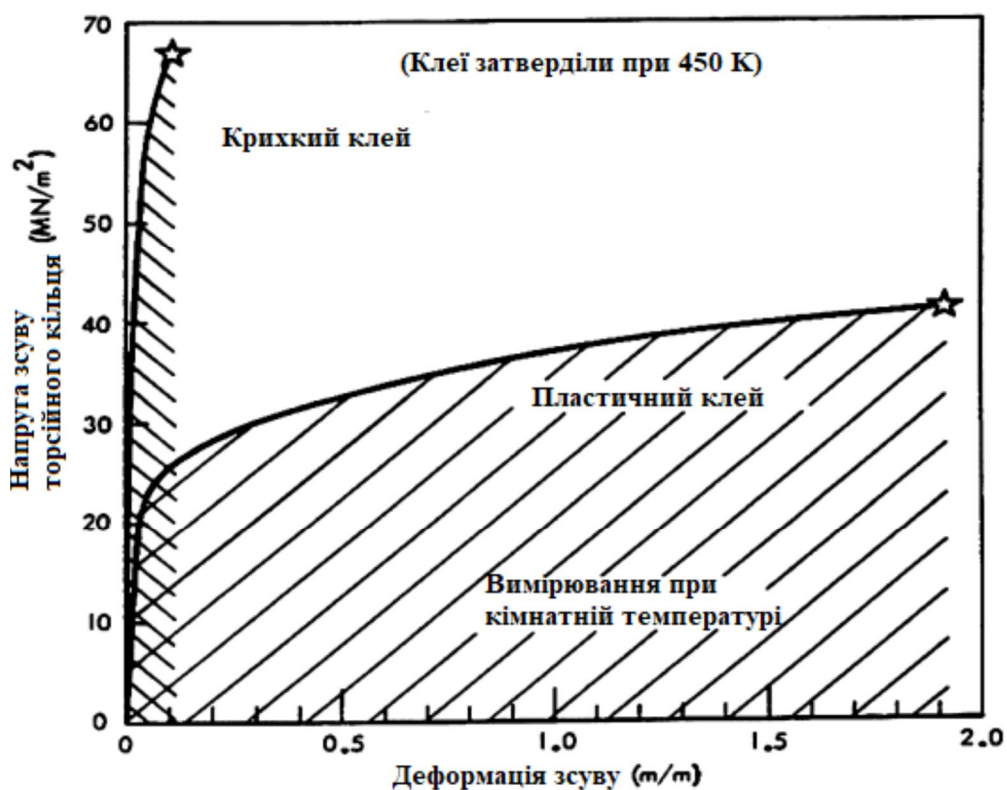
На малюнку 2.2.2 показано типову характеристику напруги-деформації адгезії при зсуві. Лінійно-пружну модель можна використовувати, коли прикладені навантаження є відносно невеликими. Перевага використання білінійної пружнопластичної моделі клею полягає в тому, що вона ближче до фактичних характеристик клею у всьому діапазоні його деформацій. У цьому випадку можна використовувати просту модель для визначення внутрішніх напружень, пов'язаних із заданим навантаженням на з'єднання, для якого невідома деформація адгезії.



Малюнок 2.2.2 Адгезійні криві напруга-деформація зсуву та математичні моделі.



Малюнок 2.2.3 Вплив температури на поведінку напруги-деформації конструкційних клеїв.



Малюнок 2.2.4 Напружено-деформована поведінка крихких і пластичних клеїв.

Характеристики клею змінюються залежно від температури (див. мал. 2.2.3) і вмісту вологи. Однак енергія деформації до руйнування не змінюється зі змінами середовища, як і окремі властивості. Як правило, пластичні епоксидні клеї використовуються для більшості склеєних з'єднань (див. рис. 2.2.3 і 2.2.4). У деяких випадках, коли робочі температури високі, можуть бути призначені набагато крихкіші клеї. Малюнок 2.2.4 ілюструє різницю в поведінці пластичного та крихкого клеїв. Як показано на цьому малюнку, навіть крихкі клеї демонструють пропорційно значну нелінійну поведінку поблизу верхньої межі робочого середовища. З цієї причини лінійної моделі недостатньо для крихких клеїв.

Розділ 3 Методи попереднього та поточного розрахунку балонів І та ІІ класів та моделювання в ANSYS

3.1 Методи попереднього проектування балонів І класу

Розділ 3 надає два основні методи кваліфікації відповідності конструкції армованого волокном пластикового резервуара під тиском. Щоб допомогти розробнику встановити товщину посудин класу І, конструкція яких повинна бути підтверджена випробуванням прототипів посудин, у цьому додатку наведено запропоновані методи визначення попередньої товщини для основних частин класу, що працюють під тиском. І судини. Крім того, у цьому Додатку вказується тип кінцевих запірних пристроїв, які були визнані задовільними, коли виготовлені з армованих волокном пластикових посудин під тиском або прикріплені до них.

Оскільки армовані волокнами пластикові ламінати можуть вийти з ладу під час циклічних навантажень на згин, розробника попереджають уникати деталей конструкції, у яких напруга на згин буде розвиватися внаслідок внутрішнього чи зовнішнього тиску чи інших навантажень.

Номенклатура

D = внутрішній діаметр спідниці голови або внутрішня довжина великої осі еліпсоїдальної головки, дюйм (мм)

N_a = необхідна кількість шарів ламінатів, в яких нитки орієнтовані в напрямку кута спіралі p

N_H = необхідна кількість шарів ламінатів, в яких нитки орієнтовані в напрямку кручів.

P = розрахунковий тиск, psi (кПа)

R = внутрішній радіус циліндра чи сфери, або внутрішній радіус кулі чи корони напівсферичної головки

S = орієнтовне розрахункове напруження в окружному напрямку в стінці циліндра або кулі, сформованого в мішок або відцентрового лиття. Можна наближено розрахувати, поділивши напругу при кваліфікаційному тиску посудини високого тиску подібної конструкції на 6.

S_a = допустиме розрахункове напруження спіраль-орієнтованих ниток, фунт на кв. з 400 000 фунтів на кв.

S_H = допустиме розрахункове напруження в нитках, орієнтованих на обручі, psi (кПа) [з 400 000 psi (2760 МПа) нитками Е-скла, використовуючи

одну шосту розрахункового коефіцієнта, який вимагається цим розділом, і застосовуючи ефективність 90%, Sq буде 60 000 psi (410 МПа)]

t = необхідна товщина, дюйми (мм)

t_a - товщина необхідної кількості шарів ламінатів, в яких нитки орієнтовані в плюс і мінус напрямку, дюйми (мм)

t'_a = еквівалентна товщина спірально-орієнтованих ниток на одиницю ширини шару смуг плюс і мінус а, дюйми (мм)

t_H — товщина необхідної кількості шарів ламінату в напрямку обручів, дюйм (мм)

t'_H — еквівалентна товщина волокон, орієнтованих на обручі, на одиницю ширини шару, що складається з двох товщин смуги, дюйми (мм) [для типової щільності смуги 6 ниток 225 товщини скловолоконних ровінгів на дюймів, $t'_H = 2 \times 1,125 \times 6/225 = 0,06$ дюймів (1,5 мм) при вмісті скла 709а з використанням смоли 1,2 sp gr]

V_a = об'ємна частка спірально-орієнтованих ниток [Це може коливатися від приблизно 0,45 для низьких (маленьких) кутів спіралі, намотаних при низькому натягу за допомогою смоли з високою в'язкістю на оправках великого діаметра, до приблизно 0,65 для високих (наприклад, понад 25 градусів) кутів спіралі, намотаних при низькому натягу при високому натягу з низькою в'язкістю смоли на оправках малого діаметра I

a = кут спіралі нитки для судин, намотаних ниткою, виміряний відносно лінії на поверхні оболонки, паралельної осьовій центральній лінії, град

де:

$$t_H = \frac{N_H * t'_H}{V_a} \quad (2.6)$$

$$N_H = \frac{P * R}{t'_H * S_H} \left(1 - \frac{\tan^2 a}{2}\right) \quad (2.7)$$

I також

$$t_a = \frac{N_a * t'_a}{V_a} \quad (2.8)$$

$$N_a = \frac{P * R}{2 * t'_a * S_a \cos^2 a} \quad (2.9)$$

ПРИМІТКА. Наведені вище рівняння базуються на аналізі сітки, який припускає, що смола не несе навантаження. Це дієве припущення про фактичний стан ниткоподібних композитів, які мають високу напругу.

Циліндричні оболонки. Товщина циліндричних оболонок, формованих у мішках, відлитих за допомогою відцентрового лиття та формованих контактним способом, може бути оцінена за такими рівняннями:

$$t = \frac{PR}{S} \text{ (2.10) або } P = \frac{St}{R} \text{ (2.11)}$$

Сферичні оболонки. Товщина сферичних оболонок, формованих у мішках, відлитих за допомогою відцентрового лиття та формованих контактним способом, може бути оцінена за такими рівняннями:

$$t = \frac{PR}{2S} \text{ (2.12) або } P = \frac{2St}{R} \text{ (2.13)}$$

Циліндричні оболонки. Товщина ниткоподібних циліндричних оболонок може бути оцінена за такими рівняннями:

$$t = t_H + t_a \text{ (2.14)}$$

Товщина в найтоншій точці еліпсоїдальної або напівсферичної головки під тиском на увігнуту сторону (плюс головки) може бути оцінена за рівняннями в Еліпсоїдні головки. Товщину та розрахунковий тиск напору можна оцінити за такими рівняннями:

$$t = \frac{PR}{S} \text{ (2.10) або } P = \frac{St}{R} \text{ (2.11)}$$

Напівсферичні головки. Товщину та розрахунковий тиск напівсферичної головки, у якій i не перевищує 0,356а або не перевищує 0,6655, можна оцінити за такими рівняннями:

$$t = \frac{PR}{2S} \text{ (2.12) або } P = \frac{2St}{R} \text{ (2.13)}$$

Для судин під зовнішнім тиском не можна дати жодних твердих правил чи формул. Однак при проектуванні судна слід враховувати наступне:

- (a) низький модуль пружності матеріалу;
- (b) той факт, що матеріал не є ізотропним;
- (c) орієнтація ниток у судинах, намотаних ниткою;

(d) відсутність однорідності у відцентрових литтях та різні розподіли та концентрації скляних волокон, які можна отримати у відцентрових литтях, деякі з яких непридатні для зовнішнього тиску.

ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ

(a) Усі отвори в армованих волокном пластикових посудинах під тиском повинні мати додаткове посилення у вигляді матів, прокладок тощо.

(b) Підсилення отвору повинно бути забезпечено в такій кількості та розподілі, щоб вимоги до площі для відповідного підсилення були задоволені для всіх площин, що проходять через центр отвору та перпендикулярно до поверхні судна. Для круглого отвору в циліндричній оболонці площа, яка містить вісь оболонки, є площиною найбільшого навантаження від тиску.

Необхідна площа поперечного перерізу арматури

Загальна площа поперечного перерізу арматури A , необхідна в будь-якій даній площині для посудини під внутрішнім тиском, повинна бути не менше ніж

$$A = d * t_r \quad (2.15)$$

де

d = діаметр у заданій площині отвору в армованій пластиковій конструкції

t = розрахункова товщина безшовної оболонки або головки, розрахована відповідно

Межі армування

Межі арматури товщини стінки, виміряні паралельно стінці посудини, повинні знаходитися на відстані з обох боків від осі отвору, що дорівнює діаметру отвору в армованій пластиковій конструкції.

Наявне армування в стіні

Додаткова товщина стінки посудини понад товщину, яка за оцінками є необхідною для оболонки, може розглядатися як посилення. Площа в стінці посудини, доступна як армування, визначається рівнянням:

$$A_1 = (t - t_r) d \quad (2.16)$$

де

A = площа надлишкової товщини стінки посудини, доступна для армування, дюйми² (мм²)

d = діаметр отвору в армованій пластиковій стінці, дюйм (мм)

t = фактична товщина армованої пластикової стінки, дюйм (мм)

t_r = необхідна товщина оболонки, дюйм (мм)

Коригування для нижчої міцності або нижчого модуля армуючого матеріалу

(o) Матеріал, що використовується для посилення, якщо він має нижчу міцність, ніж матеріал стінки посудини, його площа повинна бути збільшена обернено пропорційно відношенню мінімальних значень міцності двох матеріалів, щоб компенсувати за його меншу міцність. Деформація повинна бути сумісною з матеріалом, що має нижчий модуль пружності.

(b) Якщо армуючий матеріал прикріплюється до стінки посудини за допомогою адгезивного зв'язку, а не затверджується як єдине ціле з посудиною, площа клею має бути достатньою для досягнення повної міцності на розрив елемента армування.

Армування кількох отворів

(a) Якщо два сусідні отвори розташовані на відстані менше ніж у два рази від їх середнього діаметра, так що їх межі армування перекриваються, два отвори повинні бути зміцнені відповідно до вимог RD-510 комбінованою арматурою, міцність якої дорівнює сукупна міцність арматури, яка буде потрібна для окремих отворів. Жодна частина поперечного перерізу не повинна розглядатися як застосовна до більш ніж одного отвору або оцінюватися більше одного разу в об'єднаній області.

(b) Будь-яка зміна, у якій розмір отворів збільшується або відстань між отворами зменшується, слід вважати зміною в конструкції судна, яке, модифіковане таким чином, має бути перекваліфіковано.

Кріплення та опори

(a) Кріплення та опори незмінно створюють локальні напруги розтягування, кручення, зсуву, згинання або стиснення в їхній точці або на лінії контакту з корпусом посудини під тиском.

(Г) Через низький модуль пружності та міцність на зсув волокнисто-смоляних структур, вони особливо вразливі до локалізованих напруг при згині при стисненні, крученні та зсуві.

(c) Отже, розробник повинен бути особливо уважним, щоб уникати, наскільки це можливо, будь-яких непотрібних кріплень і забезпечити, щоб опори якомога менше обмежували посудину під тиском.

ВЛОЖЕННЯ

Слід уникати практики використання посудини під тиском як елемента конструкції для підтримки відповідного допоміжного обладнання, трубопроводів тощо.

Пристосування, що вимагають посилення, де необхідно використовувати насадку або ємність кріплення, необхідно передбачити місцеве підсилення для розподілу наступних прикладених напруг для забезпечення необхідної безпеки. Це підсилення має бути таким, щоб мінімізувати загальне результуюче напруження. Додатковий матеріал армування повинен плавно зливатися з навколишньою зоною. Точні правила проектування опор тут не наведені через дуже великий діапазон важливих змінних, які необхідно враховувати. Деталі повинні відповідати належній структурній практиці та бути ретельно проаналізовані на напруги. Уникнення прямого контакту з металевими опорами. Слід уникати прямого контакту металевих опор із сильно напруженими ділянками армованої волоконно-пластикової ємності під тиском, оскільки в стінці ємності можуть утворюватися небезпечно високі місцеві напруги при згині та зсуві, коли вона розширюється або стискається при зміні її тиск або температура.

Опори для горизонтальних судин

(а) Якщо горизонтальні судини повинні підтримуватися опорою сидлоподібного типу, товщина стінки судини може бути збільшена в точці контакту, плавно та поступово зміщуючи цю більш товсту секцію з більш напруженою прилеглою областю. Ця збільшена товщина повинна рівномірно поширюватися по всьому колу. Бажано, щоб судно було ізольовано від жорстких опорних сидел за допомогою амортизаційного матеріалу з дуже низьким модулем пружності. Якщо для довгомірного судна потрібні два або більше таких сидла, можуть бути потрібні спеціальні засоби для уникнення стримування ковзання внаслідок поздовжнього розширення та звуження взагалі, за винятком однієї з опор.

(б) Збільшення несучої площі опор таким чином, щоб вага на квадратний фут, що накладається судном на опори, була низькою, може усунути потребу у зміцненні стінки посудини.

Вертикальні судини, підтримувані кільцем або фланцем

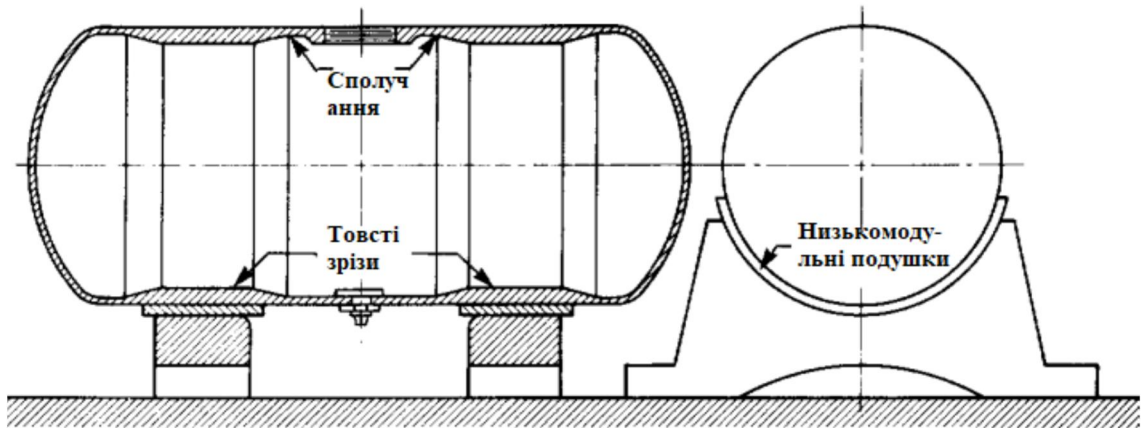
Якщо опора кільцевого або фланцевого типу використовується для підтримки вертикальної посудини, стінку посудини в основі кільця або фланця слід поступово змішувати з плавним звуженням до потовщеної ділянки та великим радіусом фільтру на переході до самої фланцевої секції.

Посудини, підтримувані металевими кріпленнями

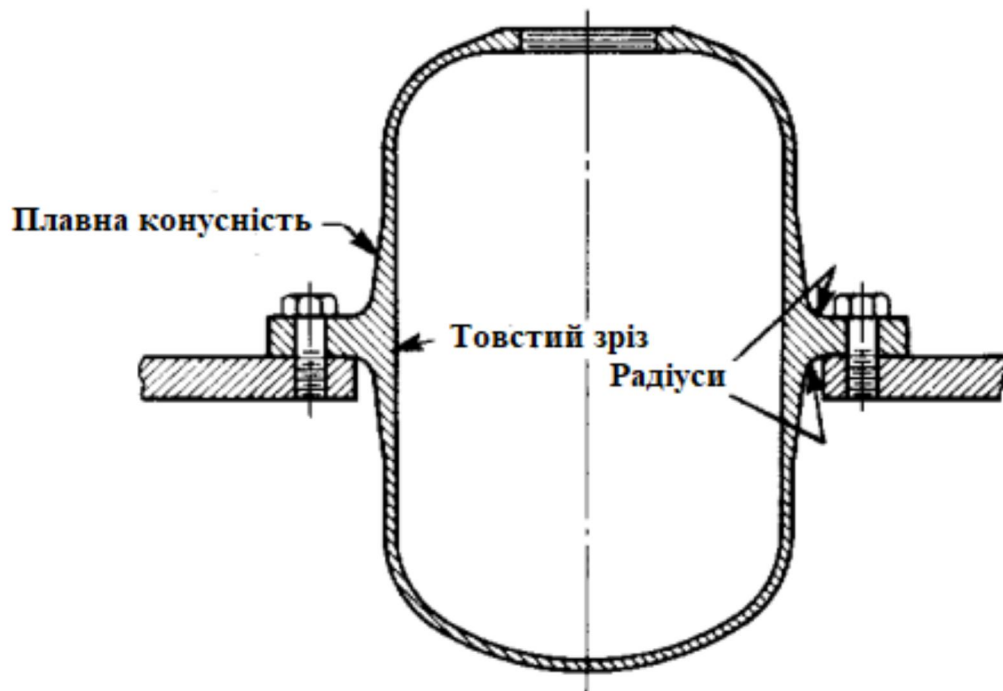
Судини часто можуть підтримуватися металевими кріпленнями, вбудованими в потовщений матеріал на осьовій центральній лінії головок.

Забезпечення зовнішніх сил

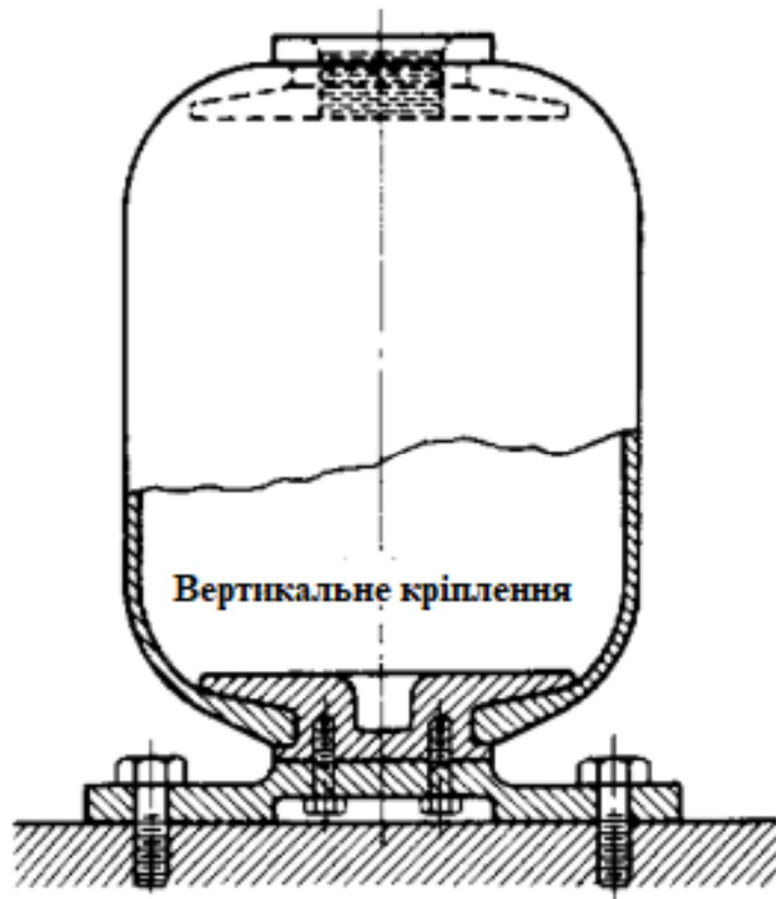
При проектуванні опор слід належним чином враховувати вітер, землетрус, сніг та будь-які інші зовнішні сили



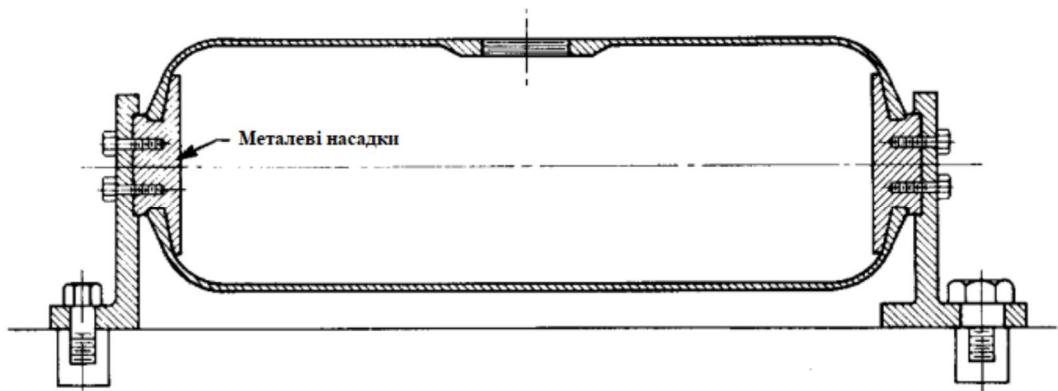
Малюнок 3.1.1 Опори сідлоподібного типу



Малюнок 3.1.2 Кільце фланцевої опори



Малюнок 3.1.3 Металеve кріплення в кінці посудини



Малюнок 3.1.4 Металеві кріплення на потовщених кінцях

3.2 Методи попереднього проектування балонів II класу

Дані

D_o = зовнішній діаметр

$$E_1 = 1.35 \cdot 10^6$$

=модуль розтягування в поздовжньому (осьовому) напрямку, psi

$$E_2 = 3.15 \cdot 10^6$$

= модуль розтягування в окружному (обручному) напрямку, psi

F = розрахунковий коефіцієнт: 5 для зовнішнього тиску на циліндри, 10 для зовнішнього тиску на сфери та головки та внутрішнього тиску на посилення

$$L = 60 \text{ дюйми}$$

= довжина циліндра

$$P = 50$$

= внутрішній тиск

$$P_A = \text{допустимий зовнішній тиск}$$

$$R = 24 \text{ дюйми}$$

= внутрішній радіус, оболонка або головка

$$r = 4 \text{ дюйми}$$

= внутрішній радіус, сопло (дюйми)

$$S_s = 1000 \text{ psi}$$

= міцність вторинного з'єднання на зсув

t = товщина, дюйми

$$\nu_1 = 0.27$$

= Коефіцієнт Пуассона, поздовжній (осьовий) напрямок

$$\nu_2 = 0.23$$

= Коефіцієнт Пуассона, напрямок по колу (обруч).

Циліндричні оболонки під рівномірним внутрішнім тиском

Виберіть більший із (a) або (b) нижче:

(a) Поздовжнє напруження

$$t = \frac{PR}{2(0.001E_1 - 0.6P)} = \frac{50 * 24}{2(0.0001 * 1.35 * 10^6 - 0.6 * 50)} \quad (2.17)$$

$$t_1 = 0.45 \text{ дюйми}$$

(b) Окружне напруження

$$t_2 = \frac{PR}{0.001E_2 - 0.6P} = \frac{50 * 24}{0.001 * 3.15 * 10^6 - 0.6 * 50} \quad (2.18)$$

$$t_2 = 0.38 \text{ дюйма} < 0.45$$

Тому нехай

$$t = t_1 = 45 \text{ дюйма}$$

Сферичні оболонки під внутрішнім тиском

Припустимо, що ручна розкладена сфера з $E_1 = E_2 = 2.2 * 10^6 \text{ psi}$:

$$t = \frac{PR}{2(0.001E - 0.6P)} = \frac{50 * 24}{2(0.001 * 2.2 * 10^6 * 50)} \quad (2.19)$$

$$t = 0.28 \text{ дюйма}$$

Циліндричні оболонки під зовнішнім тиском

Критична довжина: $t = 0.25 \text{ дюйма}$ $D_o = 2(R + t) = 48.50$

$$L_c = 1.14^4 \sqrt{1 - \nu_1 \nu_2} D_o \sqrt{\frac{D_o}{t}} = 1.14^4 \sqrt{1 - 0.27 * 0.23} * 48.50 \sqrt{\frac{48.50}{0.25}} \quad (2.20)$$

$$L_c = 757.9 \text{ дюйма} > L$$

$$E_r = \sqrt{E_1 E_2} = \sqrt{1.35 * 10^6 * 3.15 * 10^6} \quad (2.21)$$

$$E_r = 2.06 * 10^6$$

та

$$K = 3.6 - \frac{2E_r}{E_1 + E_2} = 3.6 - \frac{2 * 2.06 * 10^6}{1.35 * 10^6 + 3.15 * 10^6} \quad (2.22)$$

$$K = 2.68$$

Для зовнішнього тиску нехай $F = 5$:

$$P_A = \frac{K \frac{E_r}{F} \frac{D_o}{L} \left(\frac{t}{D_o}\right)^{\frac{5}{2}}}{1 - 0.45 \sqrt{\frac{t}{D_o}}} = \frac{2.68 \frac{2.06 * 10^6}{5} \frac{48.50}{60} \left(\frac{0.25}{48.50}\right)^{\frac{5}{2}}}{1 - 0.45 \sqrt{\frac{0.25}{48.50}}} \quad (2.23)$$

$$P_A = 1.76 \text{ psi}$$

Сферичні оболонки під рівномірним зовнішнім тиском

$$P_A = \frac{0.41 \frac{E}{F} * t^2}{\sqrt{3(1 - \nu_1 \nu_2)} R_o^2} = \frac{0.41 \frac{2.2 * 10^6}{10} 0.25^2}{\sqrt{3(1 - 0.27 * 0.23)} 24.25^2} \quad (2.24)$$

$$P_A = 5.72 \text{ psi}$$

Товщина головок під внутрішнім тиском

(a) Еліпсоїдна голова

$$t = \frac{PD}{2(0.001E - 0.6P)} = \frac{50.48}{2(0.001 * 2.2 * 10^6 - 0.6 * 50)} \quad (2.25)$$

$$t = 0.55 \text{ дюйма}$$

(b) Напівкуляста голова

$$t = \frac{PR}{2(0.001E - 0.6P)} = \frac{50 * 24}{2(0.001 * 10^6 - 0.6 * 50)} \quad (2.26)$$

$$t = 0.28 \text{ дюйма}$$

Товщина головок під зовнішнім тиском

$$P_A = \frac{0.41 \frac{E}{F} t^2}{\sqrt{3(1 - \nu_1 \nu_2)(K_o D_o)^2}} = \frac{0.41(2.2 * 10^6)0.25^2}{\sqrt{3(1 - 0.27 * 0.23)(0.9 * 48.25)^2}} \quad (2.27)$$

$$P_A = 1.78 \text{ psi}$$

Підсилення отворів та кріплення форсунок

(a) Довжина вторинної насадки на насадці

$$L_b = \frac{Pr}{2 \frac{S_s}{F}} = \frac{50 * 4}{2 \frac{1000}{10}} \quad (2.28)$$

$$L_b = 1 < 3$$

Тому нехай $L_b = 3$ дюйми

(b) Товщина вторинного накладення

$$t_b = \frac{Pr}{S_a - 0.6P} = \frac{50 * 4}{2.2 * 10^3 - 0.6 * 50} \quad (2.28)$$

$$t_b = 0.09 < 0.25$$

Тому нехай $t_b = 0.25$ дюйми

(c) Товщина моєї підсилювальної накладки на корпусі або голові

$$t_{pl} = \frac{PR}{0.001E_2} = \frac{50 * 24}{2.2 * 10^3} \quad (2.29)$$

$$t_{pl} = 0.55 \text{ дюйма}$$

Обчислюємо бета фактор

$$\beta = \frac{\sqrt[4]{3(1-\nu_1\nu_2)}}{2} \frac{r}{\sqrt{Rt}} = \frac{\sqrt[4]{3(1-0.27*0.23)}}{2} \frac{4}{\sqrt{24*0.25}} \quad (2.30)$$
$$\beta = 1.06$$

Визначаємо момент

$$M = \frac{s_{\max} t^2}{6} = \frac{1.94 * 10^2 * 0.25^2}{6} \quad (2.31)$$
$$M = 201.7$$

Визначаємо товщину арматури

$$t_{p2} = \sqrt{\frac{6M}{S_f}} - t = \sqrt{\frac{6 * 201.7}{2.25 * 10^3}} - 0.25 \quad (2.32)$$
$$t_{p2} = 0.27 < 0.55$$

Тому нехай $t_p = t_{pl} = 0.55$ дюйми

(d) Довжина армуючої прокладки

$$L_p = \frac{\pi L_c P}{4 S_s F} = \frac{\pi 8 * 50}{4 * 1000} \quad (2.33)$$
$$L_p = 3.14 < 6$$

Відповідно до вимог $L_p = 6$ дюймів

Накладка з'єднання головки до оболонки, що випадає на внутрішній тиск

(a) Товщина накладки

$$t_o = \frac{P(R+t)}{0.001 E_2} = \frac{50(24+0.25)}{0.001 * 2.2 * 10^6} \quad (2.34)$$
$$t_o = 0.55 \text{ дюйма}$$

(b) Довжина накладання

$$L_o = \frac{PR}{\left(\frac{2S_s}{F}\right)} = \frac{50 * 24}{\left(\frac{2 * 1000}{10}\right)} \quad (2.35)$$
$$L_o = 6 \text{ дюйма}$$

Розділ 4 Оптимізація геометрії з'єднань на основі симуляційної моделі

4.1 Модифікований поліноміальний критерій міцності для шаруватих композитів за С.М. Верещакою.

Обираємо серед доступних критеріїв міцності модифікований поліноміальний критерій міцності за С.М. Верещакою.

Таблиця 4.1.1 – Технічні константи для модифікований поліноміальний критерій міцності за С.М. Верещакою.

CFRP	$\sigma_{33}^+, \text{Па}$	$\sigma_{33}^-, \text{Па}$	$\sigma_{11}^+, \text{Па}$	$\sigma_{11}^-, \text{Па}$	$\sigma_{22}^+, \text{Па}$	$\sigma_{22}^-, \text{Па}$	$\tau_{13}^+, \text{Па}$	$\tau_{13}^-, \text{Па}$	$\tau_{12}^+, \text{Па}$	$\tau_{12}^-, \text{Па}$	$\tau_{23}^+, \text{Па}$	$\tau_{23}^-, \text{Па}$
вуглепластик	1,20E+08	6,00E+08	1,24E+09	5,40E+08	1,24E+09	5,40E+08	1,80E+08	1,80E+08	3,00E+08	3,00E+08	1,80E+08	1,80E+08
	R11	R22	R33	R1111	R2222	R3333	R1212	R1313	R2323	R1122	R1133	R2233
	1,043E-09	1,043E-09	6,667E-09	1,498E-18	1,498E-18	1,389E-17	2,778E-18	7,716E-18	7,716E-18	7,054E-18	7,504E-18	7,504E-18

Значна відмінність граничних характеристик несучих шарів і властивостей проміжних міжфазних шарів обумовлює вибір тієї або іншої моделі дискретно-структурної теорії пластин і оболонок. Стає очевидним, що розшарування необхідно розглядати не як окремих вид руйнування, а як фактор, що визначає вид дискретно-структурної моделі багатошарової конструкції.

Таким чином, для оцінки ступеня впливу послабленого міжфазного контакту шарів критерій слід записувати у модифікованому вигляді:

$$\begin{aligned}
 & R_{11}\sigma_{11} + R_{22}\sigma_{22} + R_{33}\sigma_{33} + R_{1111}\sigma_{11}^2 + R_{2222}\sigma_{22}^2 + \\
 & + R_{3333}\sigma_{33}^2 + 4R_{1212}\sigma_{12}^2 + 4R_{1313}\sigma_{13}^2 + 4R_{2323}\sigma_{23}^2 + \\
 & + 2R_{1122}\sigma_{11}\sigma_{22} + 2R_{1133}\sigma_{11}\sigma_{33} + 2R_{2233}\sigma_{22}\sigma_{33} = 1,
 \end{aligned} \tag{4.1.1}$$

де до тензорів поверхні міцності (4.1.1) потрібно за наведеною раніше методикою додати додаткові компоненти:

$$\begin{aligned}
 R_{33} &= \frac{\sigma_{33}^- - \sigma_{33}^+}{\sigma_{33}^- \sigma_{33}^+}, & R_{3333} &= \frac{1}{\sigma_{33}^- \sigma_{33}^+}, \\
 4R_{1313} &= \frac{1}{\sigma_{13}^- \sigma_{13}^+}, & 4R_{2323} &= \frac{1}{\sigma_{23}^- \sigma_{23}^+}, \\
 2R_{1133} &= \frac{R_{11} - R_{33}}{\sigma_{13}^-} + R_{1111} + R_{3333} + \frac{1}{(\sigma_{13}^-)^2}, \\
 2R_{2233} &= \frac{R_{22} - R_{33}}{\sigma_{23}^-} + R_{2222} + R_{3333} + \frac{1}{(\sigma_{23}^-)^2}.
 \end{aligned} \tag{4.1.2}$$

При цьому вважається, що міжшарова міцність матеріалу на зсув не залежить від знака поперечних дотичних напружень, тобто $\sigma_{13}^+ = \sigma_{13}^-$, $\sigma_{23}^+ = \sigma_{23}^-$.

4.2 План двофакторного чисельного експерименту з розрахунком коефіцієнтів взаємодій чинників.

Раніше вже згадувалося, що мета плану чисельного експерименту (ПЧЕ) - отримання адекватної лінійної моделі, яку передбачається використовувати для оптимізації об'єкта дослідження. У завданнях інтерполяції ж математична модель повинна адекватно описувати об'єкт в області експерименту і тому може бути нелінійною. Плани ПЧЕ, з одного боку, дозволяють досить просто розрахувати коефіцієнти при взаємодіях факторів і, якщо вони значущі, використовувати отриману модель для інтерполяційних цілей. З іншого боку, значимість коефіцієнтів при взаємодіях факторів відразу ж дозволяє зробити висновок про неадекватність лінійної моделі. Вихідні дані на відміну попереднього поповнюються умовою необхідності розрахунку коефіцієнтів при взаємодіях чинників, т. е. шукається модель модифікованого поліноміального критерію міцності для шаруватих композитів за С.М. Верещакою у вигляді.

$$\hat{y} = b_0x_0 + b_1x_1 + \dots + b_nx_n + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{ij}x_ix_j + \dots = \sum_{i=0}^n b_ix_i + \sum_{i \neq j} b_{ij}x_ix_j \quad (4.2.1)$$

$$Xf = \begin{pmatrix} 0.111 & 0.111 \\ 0.111 & 0.111 \\ 0.111 & 0.111 \\ 0.111 & 0.111 \\ 1.111 & -0.889 \\ 1.111 & -0.889 \\ -0.889 & 1.111 \\ -0.889 & 1.111 \\ -0.889 & -0.889 \end{pmatrix}$$

Таблиця 4.2.2 - План експерименту

Номер досліджу	x_0	План						Вихідна змінна
		Запланований			Розрахунковий			
		x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_1
2	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	y_2
3	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	y_3
4	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	y_4
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	y_5
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	y_6
7	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	y_7
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	y_8

Розрахунок коефіцієнтів проводиться за рівнянням:

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u, i = 1, 2, \dots, n, i \neq j \quad (4.2.2)$$

Зауваження 1. У завданнях оптимізації необхідно, щоб всі b_{ij} були незначущі, а в задачах інтерполяції навпаки – значимі. Тому для задач оптимізації завжди проводять розрахунок b_{ij} і використовують їх для перевірки адекватності моделі.

Зауваження 2. Існує ще одна перевірка нелінійності моделі оцінкою гіпотези про рівність нулю суми коефіцієнтів при квадратичних членах. З цією метою в центрі плану ставлять кілька дослідів, \bar{y}_0 і обчислюють різницю $(b_0 - \bar{y}_0)$, яка і є оцінкою суми коефіцієнтів при квадратичних членах. Дійсно, вільний член b_0 , який розраховують по рівняння:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{0u} y_u = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N y_u = \bar{y} \quad (4.2.3)$$

є спільною оцінкою β_0 та $\sum_{i=1}^n \beta_{ij}$

$$b_0 \rightarrow \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_{ij} \quad (4.2.4)$$

де β_0 - вільний член рівняння регресії за генеральним сукупності експериментальних даних; β_{ij} - коефіцієнти при x^2 і також по генеральній сукупності. Це положення випливає з ідентичності стовпців матриці планування при x_0 і x^2 і (вони всі рівні +1).

Тоді різниця $(\bar{y} - \bar{y}_0) \rightarrow \sum \beta_{ij}$ може в якійсь мірі служити оцінкою кривизни поверхні відгуку вихідної змінної. Значимість цієї різниці перевіряють за умовою:

$$t_p = \frac{(b_0 - \bar{y}_0) \sqrt{N}}{S_0} > t_T \quad (4.2.5)$$

де s_0 - середньоквадратичне відхилення помилок досвіду; N - число дослідів; t_T - табличне значення критерію Стьюдента для числа ступенів свободи дисперсії s^2 і рівня значущості q . Виконання умови свідчить про значущість квадратичних членів, і потрібно їх введення в інтерполяційне рівняння або зменшення інтервалів варіювання факторів для отримання адекватної лінійної моделі.

Факторний експеримент другого порядку

Завданням факторного експерименту другого порядку є проведення оптимального плану досліджень, отримання нелінійної моделі та її статистичний аналіз. модель застосовується для пошуку координати оптимуму і може використовуватися для цілей інтерполяції і екстраполяції. Зазвичай факторний експеримент другого порядку використовується для опису істотно нелінійних об'єктів полиномом

$$\bar{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ij} x_i^2 \quad (4.2.6)$$

Пояснення. Побудувати плани, за якими можна отримати модель в вигляді за допомогою раніше розглянутих алгоритмів не вдається хоча б тому, що умова ортогональності в шпальтах матриці не виконується (сума елементів стовпців не дорівнює нулю). Також потрібно поставити велику кількість дослідів. Очевидно, що планування на трьох рівнях 3 п неекономічно і тому запропоновано доповнити план ПФЕ 2 п певними точками факторного простору так, щоб виконувалася умова ортогональності або ротатабельності, але при цьому число дослідів таких планів було меншим, ніж ПФЕ 3 п:

$$N = 2^n + 2n + N_0 < 3^n \quad (4.2.7)$$

де кожний доданок визначає число дослідів ПФЕ 2 п, число «Зіркових» і число нульових дослідів (в центрі плану). з формули випливає, що пропонувані плани (при $n > 2$) економічніше планів на трьох рівнях (зазвичай $N_0 = 1$). Великою перевагою таких планів є те, що їх можна отримувати з планів 2 п. Для побудови використовується план 2 п, лінійна модель за яким при пошуку області оптимуму виявилася неадекватною. Всі проведені експерименти залишаються, а план поповнюється певною кількістю спеціально підібраних «Зіркових» точок.

Організовані таким чином плани називаються центральними і композиційними. Загальний вигляд плану наведено в таблиці.

Таблиця 4.2.2 - План експерименту

Номер дослідження	x_0	План					Вихідна змінна
		x_1	x_2	$x_1 x_2$	x_1^2	x_2^2	
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_1
2	+1	+1	-1	-1	+1	+1	y_2
3	+1	-1	+1	-1	+1	+1	y_3
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	y_4
5	+1	+ α	0	0	α^2	0	y_5
6	+1	- α	0	0	α^2	0	y_6
7	+1	0	+ α	0	0	α^2	y_7
8	+1	0	- α	0	0	α^2	y_8
9	+1	0	0	0	0	0	y_9

Вибір плеча «зіркових» точок і числа нульових точок залежить від критерію оптимальності плану. На практиці широко застосовуються ортогональні і ротатабельні плани другого порядку.

Найменування елементів плану	Число незалежних факторів			
	2	3	4	5
Ядро плану	2^2	2^3	2^4	2^{5-1}
α	1,00	1,215	1,414	1,547

Таблиця 4.2.3

Де формалізовані централізовані змінні геометрії – компоненти вектора X : X_1 та X_2 є точками варіантів чисельних експериментів плану.

$$X = \begin{pmatrix} -1 & -1 \\ 1 & -1 \\ -1 & 1 \\ 1 & 1 \\ \sqrt{2} & 0 \\ -\sqrt{2} & 0 \\ 0 & \sqrt{2} \\ 0 & -\sqrt{2} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Таблиця(4.2.4)

Результатом є вектор Y значень модифікованого поліноміального критерію міцності для шаруватих композитів за С.М. Верещакою у вигляді

$$Y := \begin{pmatrix} 2.4546 \\ 1.7546 \\ 0.6399 \\ 0.9565 \\ 2.6485 \\ 1.8212 \\ 1.2312 \\ 1.0222 \\ 0.9888 \end{pmatrix}$$

Таблиця(4.2.5)

Зворотнє перетворення вектору X на вектор $LovLn$.

$$LovLn := \begin{pmatrix} \frac{lovmax - lovmin}{2\sqrt{2}} \cdot X_{0,0} + \frac{lovmax + lovmin}{2} & \frac{lnmax - lnmin}{2\sqrt{2}} \cdot X_{0,1} + \frac{lnmax + lnmin}{2} \\ \frac{lovmax - lovmin}{2\sqrt{2}} \cdot X_{1,0} + \frac{lovmax + lovmin}{2} & \frac{lnmax - lnmin}{2\sqrt{2}} \cdot X_{1,1} + \frac{lnmax + lnmin}{2} \\ \frac{lovmax - lovmin}{2\sqrt{2}} \cdot X_{2,0} + \frac{lovmax + lovmin}{2} & \frac{lnmax - lnmin}{2\sqrt{2}} \cdot X_{2,1} + \frac{lnmax + lnmin}{2} \\ \frac{lovmax - lovmin}{2\sqrt{2}} \cdot X_{3,0} + \frac{lovmax + lovmin}{2} & \frac{lnmax - lnmin}{2\sqrt{2}} \cdot X_{3,1} + \frac{lnmax + lnmin}{2} \\ \frac{lovmax - lovmin}{2\sqrt{2}} \cdot X_{4,0} + \frac{lovmax + lovmin}{2} & \frac{lnmax - lnmin}{2\sqrt{2}} \cdot X_{4,1} + \frac{lnmax + lnmin}{2} \\ \frac{lovmax - lovmin}{2\sqrt{2}} \cdot X_{5,0} + \frac{lovmax + lovmin}{2} & \frac{lnmax - lnmin}{2\sqrt{2}} \cdot X_{5,1} + \frac{lnmax + lnmin}{2} \\ \frac{lovmax - lovmin}{2\sqrt{2}} \cdot X_{6,0} + \frac{lovmax + lovmin}{2} & \frac{lnmax - lnmin}{2\sqrt{2}} \cdot X_{6,1} + \frac{lnmax + lnmin}{2} \\ \frac{lovmax - lovmin}{2\sqrt{2}} \cdot X_{7,0} + \frac{lovmax + lovmin}{2} & \frac{lnmax - lnmin}{2\sqrt{2}} \cdot X_{7,1} + \frac{lnmax + lnmin}{2} \\ \frac{lovmax - lovmin}{2\sqrt{2}} \cdot X_{8,0} + \frac{lovmax + lovmin}{2} & \frac{lnmax - lnmin}{2\sqrt{2}} \cdot X_{8,1} + \frac{lnmax + lnmin}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.1314 & 0.1314 \\ 0.1746 & 0.1314 \\ 0.1314 & 0.1746 \\ 0.1746 & 0.1746 \\ 0.1836 & 0.153 \\ 0.1224 & 0.153 \\ 0.153 & 0.1836 \\ 0.153 & 0.1224 \\ 0.153 & 0.153 \end{pmatrix}$$

Таблиця(4.2.6)

$$\hat{y} = b_0x_0 + b_1x_1 + \dots + b_nx_n + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{ij}x_ix_j + \dots = \sum_{i=0}^n b_i x_i + \sum_{i \neq j} b_{ij} x_i x_j \quad (4.2.6)$$

Коефіцієнти функції складуть

$$b_{0f} := \frac{\sum_{j=0}^{N-1} Y_j}{N} \quad b_{0f} = 1.502$$

$$b_1 := \frac{\sum_{j=0}^{N-1} (X_{j,0} \cdot Y_j)}{\sum_{j=0}^{N-1} (X_{j,0})^2} \quad b_1 = 0.098$$

$$b_2 := \frac{\sum_{j=0}^{N-1} (X_{j,1} \cdot Y_j)}{\sum_{j=0}^{N-1} (X_{j,1})^2} \quad b_2 = -0.29$$

$$b_{12} := \frac{\sum_{j=0}^{N-1} (X_{j,0} \cdot X_{j,1} \cdot Y_j)}{\sum_{j=0}^{N-1} (X_{j,0} \cdot X_{j,1})^2} \quad b_{12} = 0.254$$

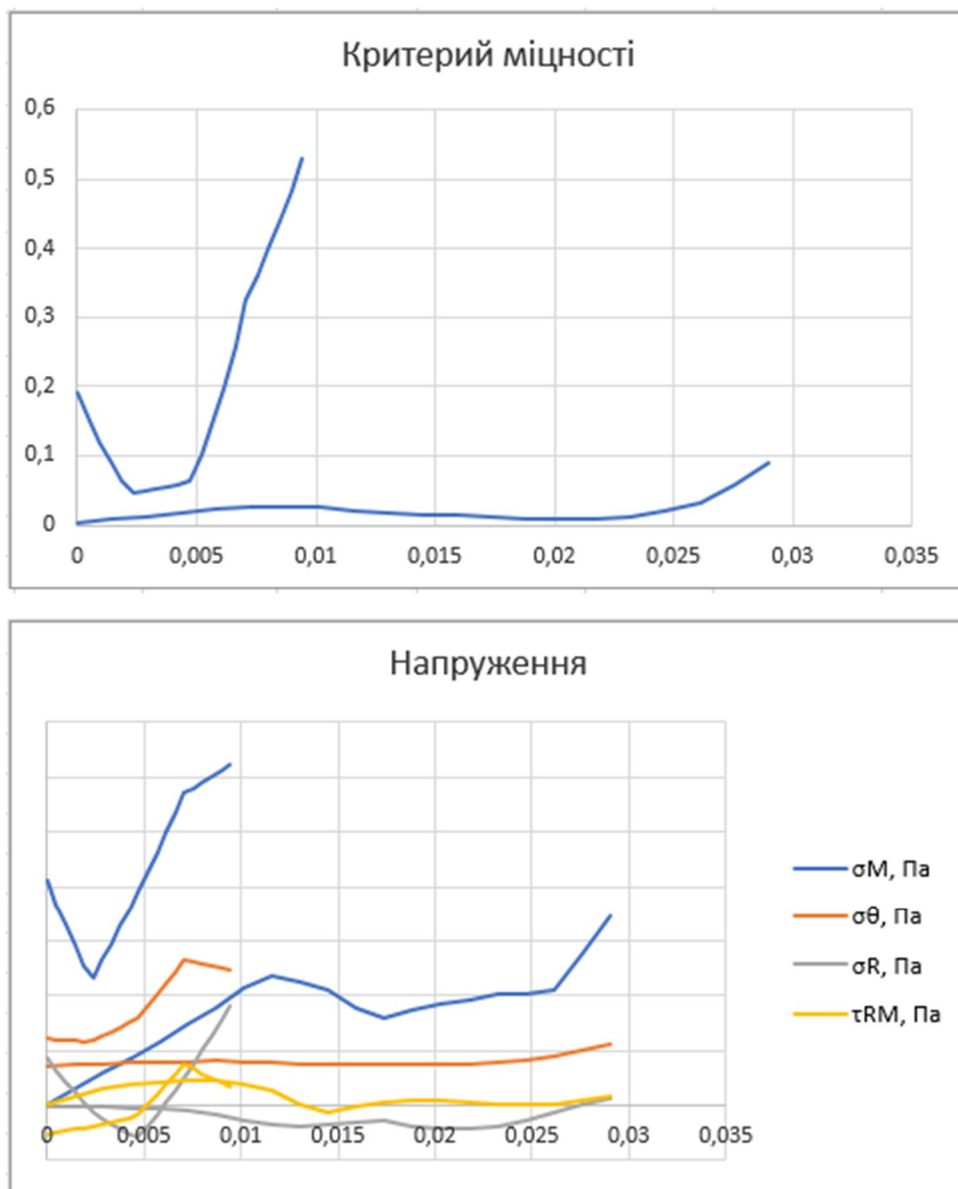
(4.2.7)

Мінімізувавши функцію

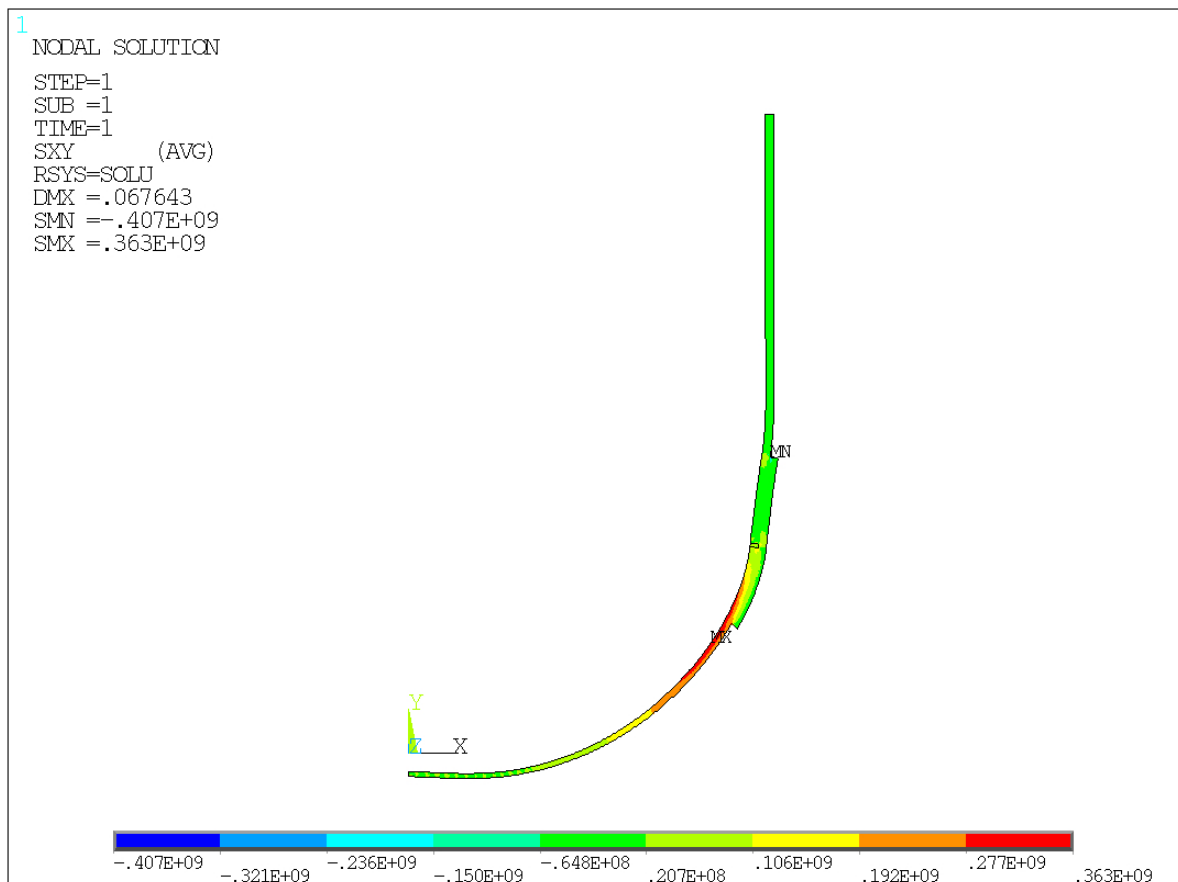
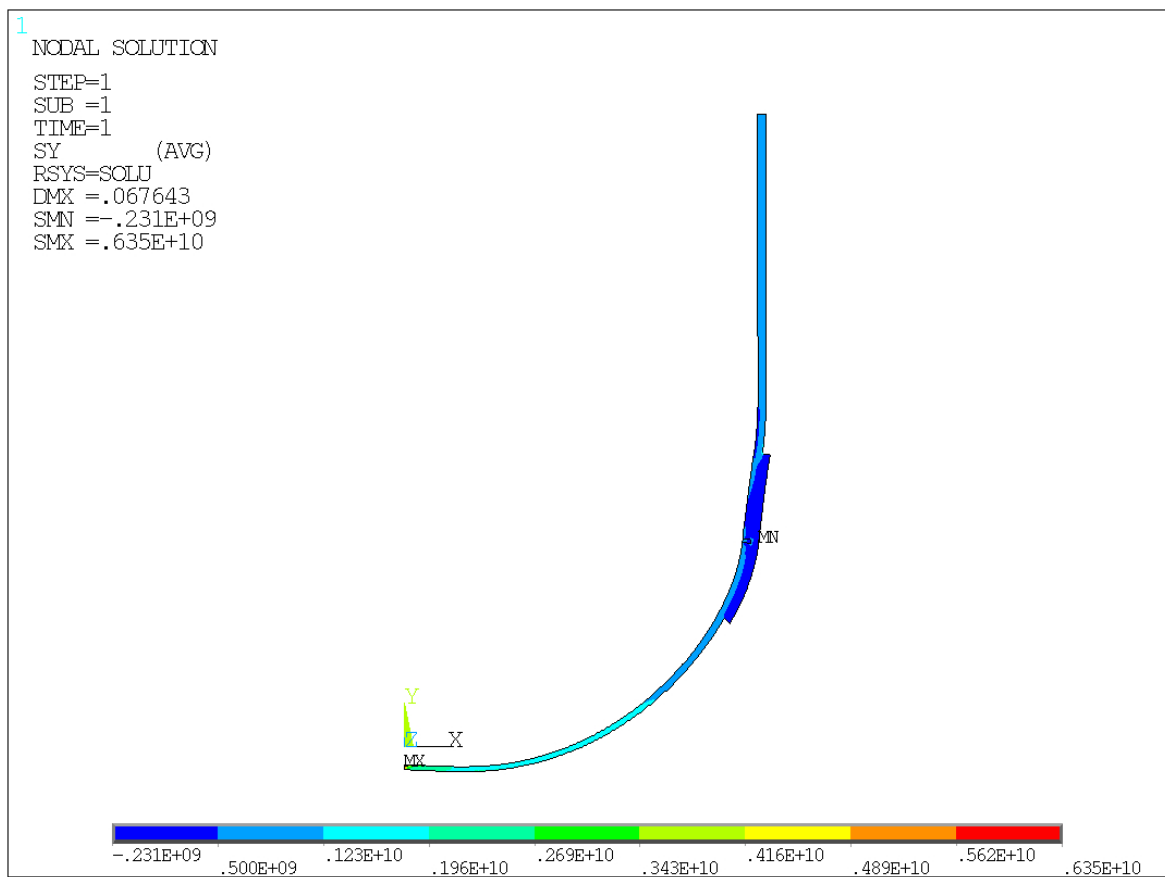
$$\hat{y} = b_0 x_0 + b_1 x_1 + \dots + b_n x_n + b_{12} x_1 x_2 + \dots + b_{ij} x_i x_j + \dots = \sum_{u=0}^n b_u x_u + \sum_{i \neq j} b_{ij} x_i x_j \quad (4.2.8)$$

визначимо значення для шуканого варіанту оптимізованою геометрією
 відповідає $L_{ov} = 0.153$ $L_n = 0,144$.

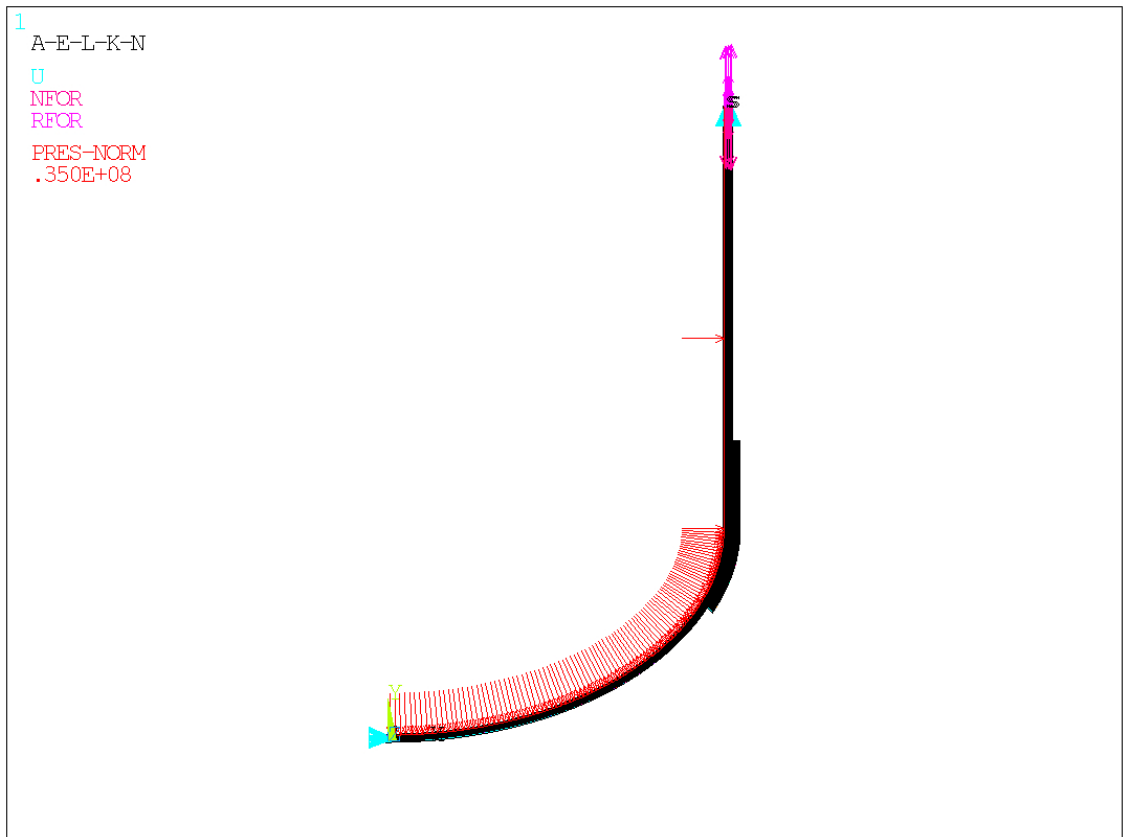
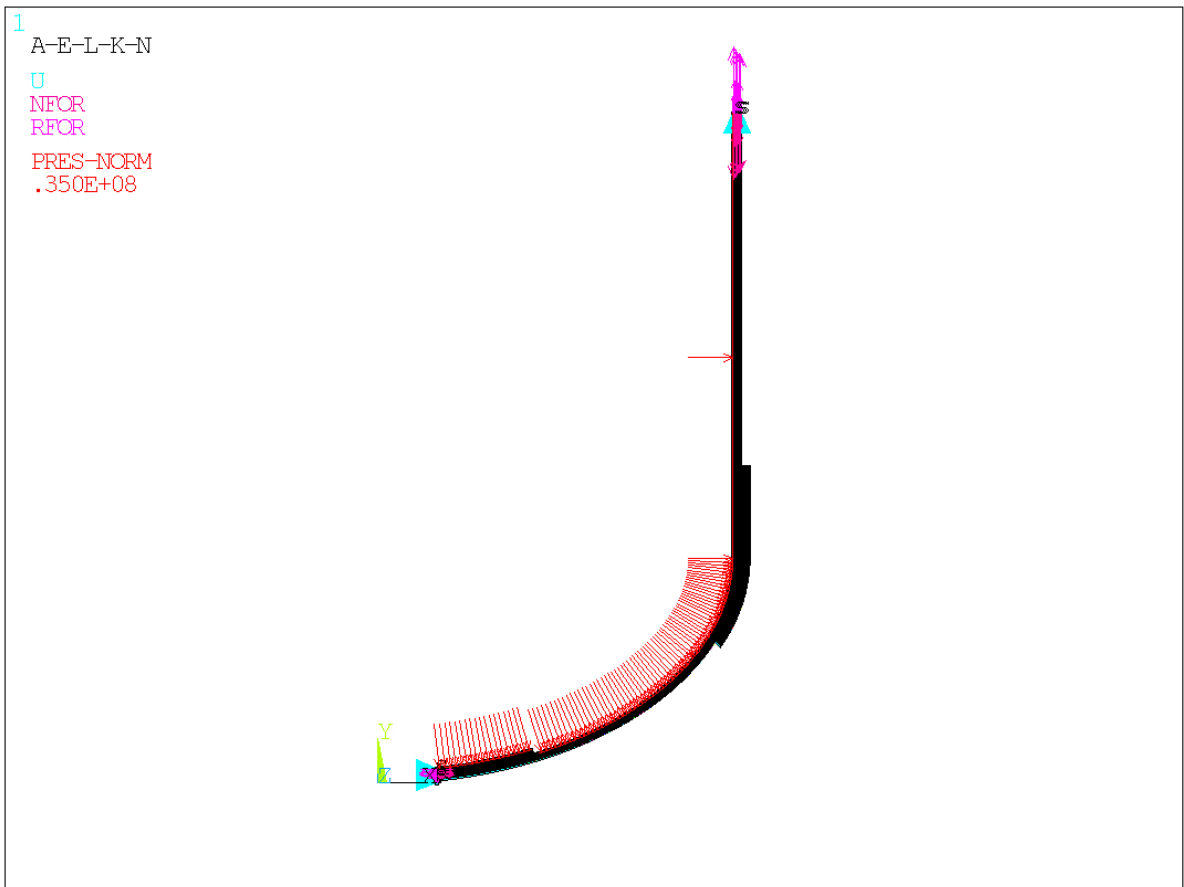
4.3 Результати чисельних експериментів



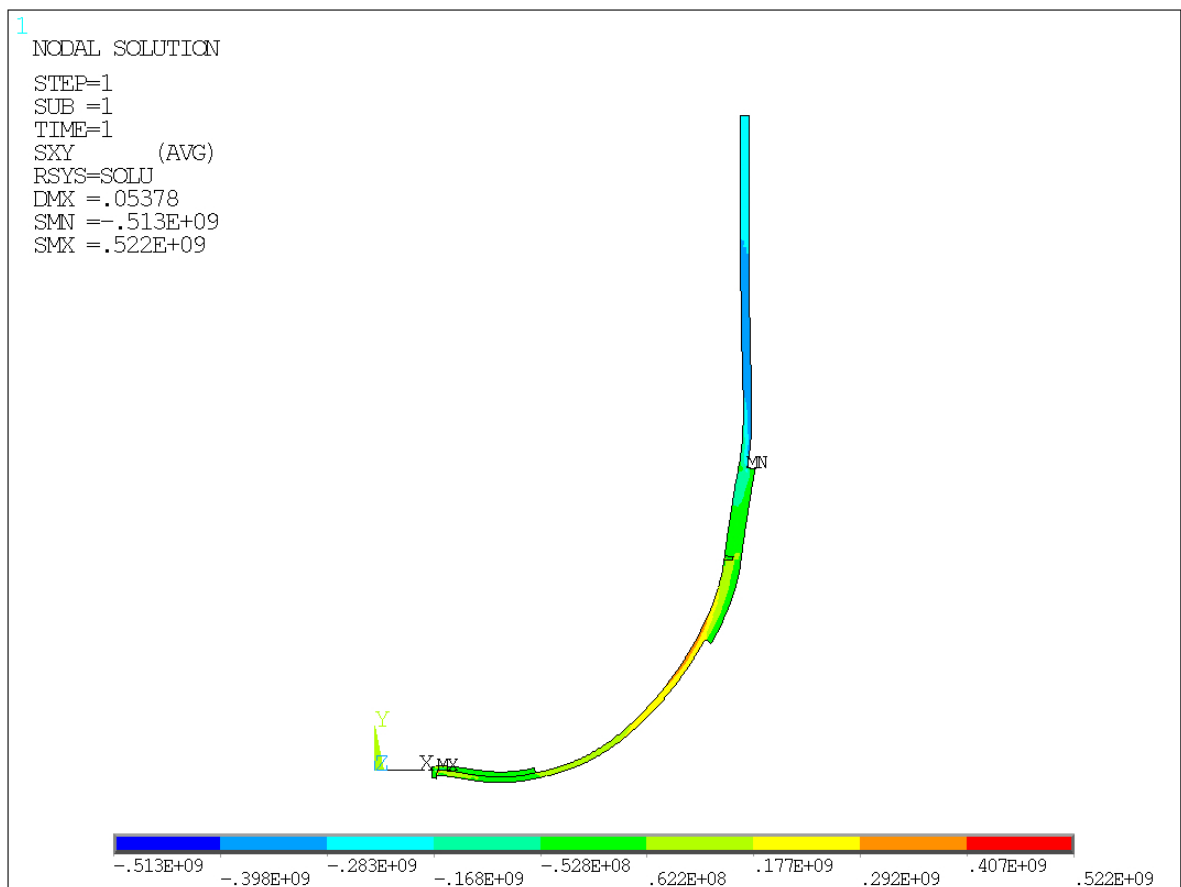
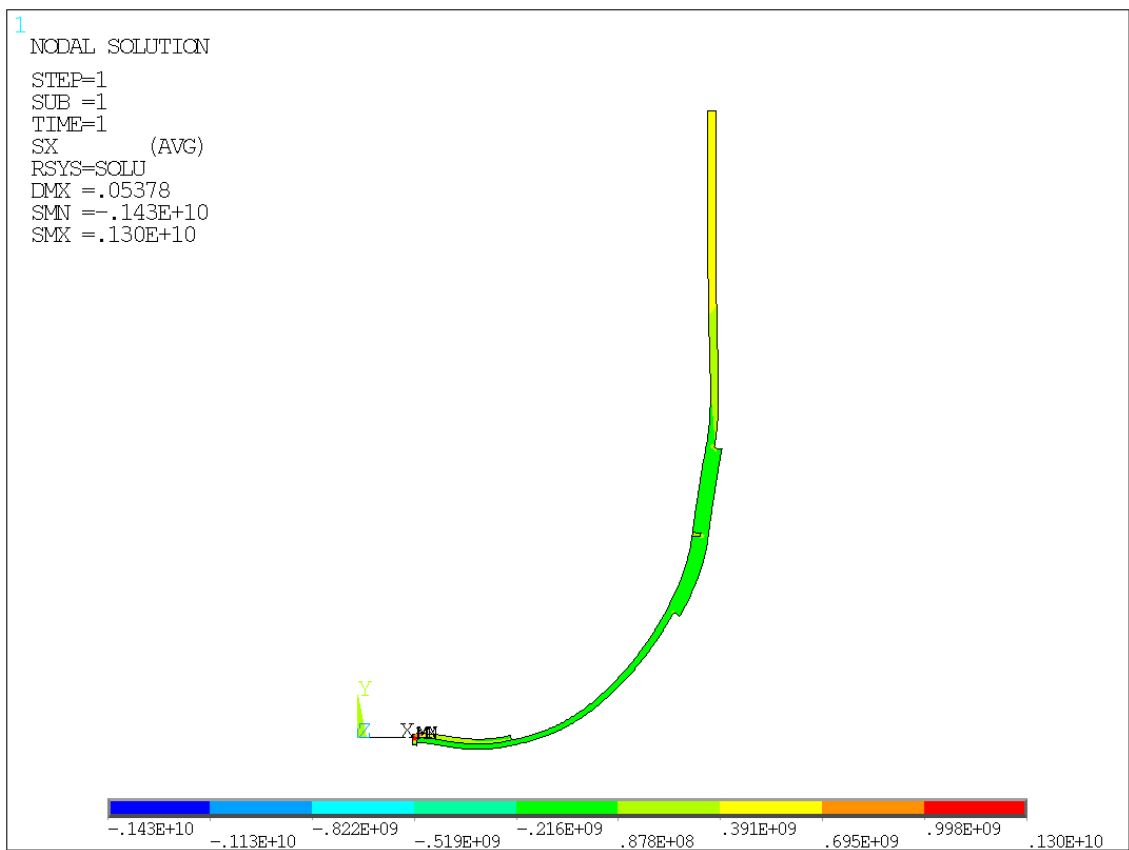
Малюнок 4.3.1 – Результати чисельного моделювання варіанту найбільш оптимального з'єднання.



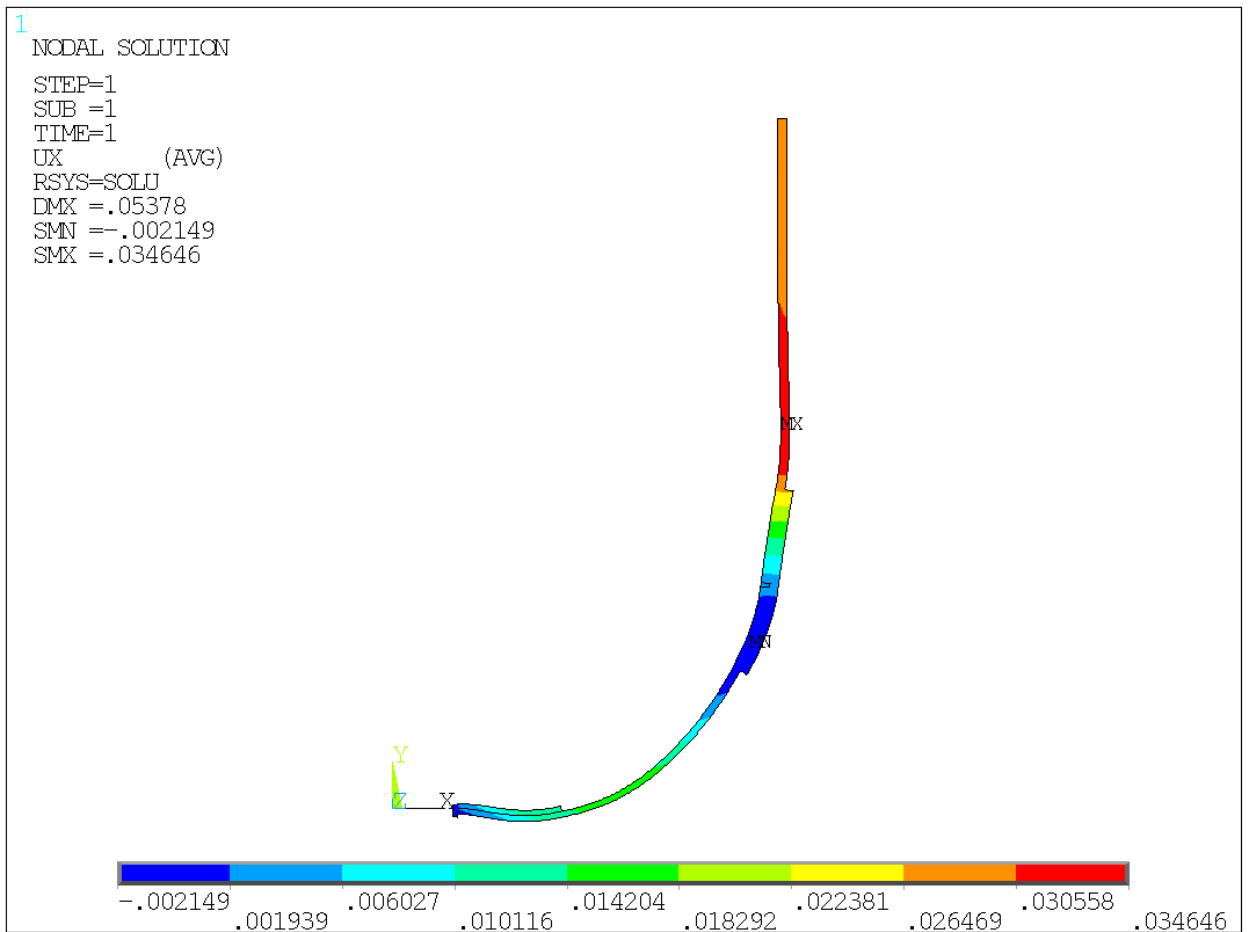
Малюнок 4.3.2 – Нормальні напруження фінального варіанту напруженого стану.



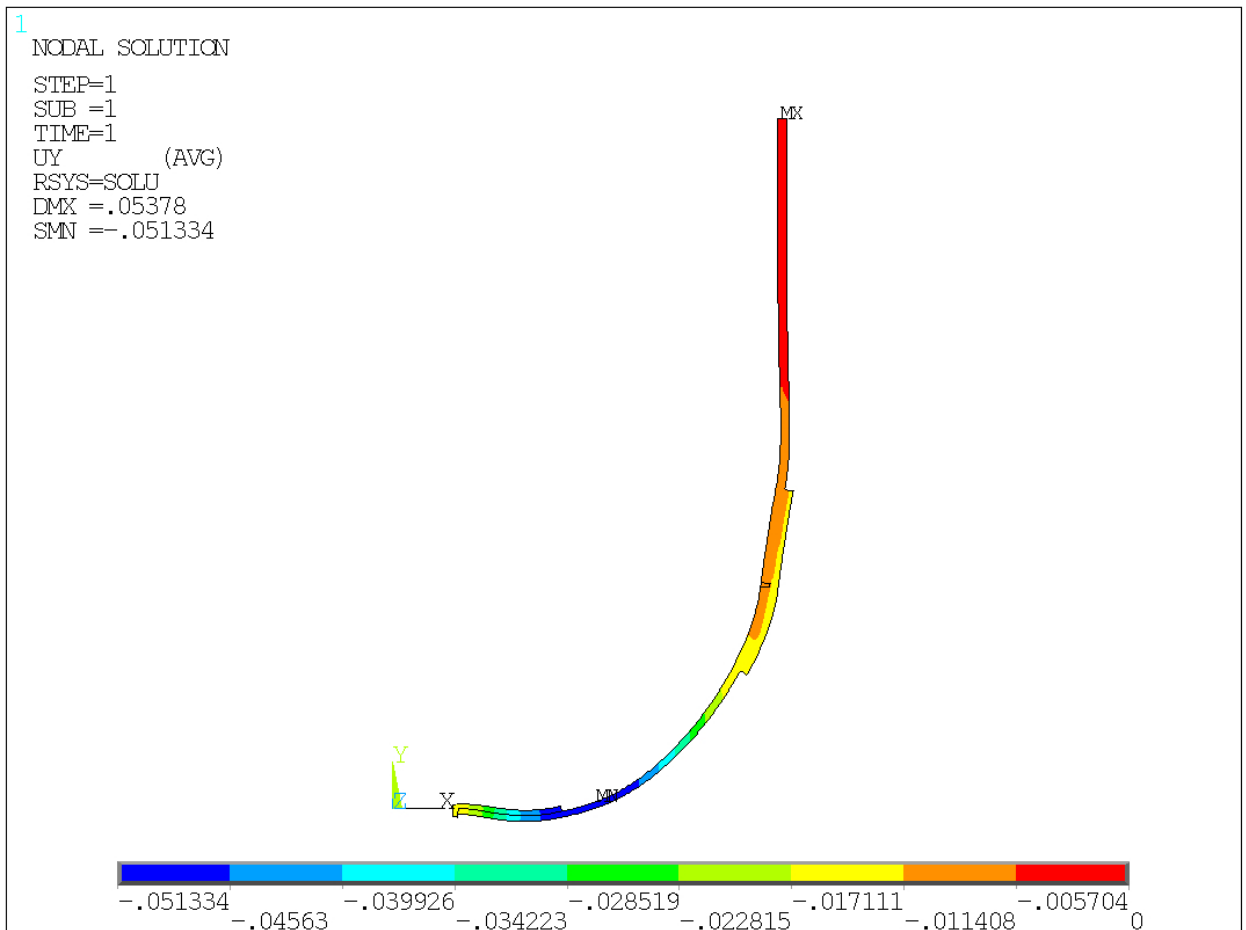
Малюнок 4.3.3 – Колові напруження фінального варіанту напруженого стану σ_θ , Па.



Малюнок 4.3.4 – Допустимі напруження трансверсального обтиснення σ_R , Па.



Малюнок 4.3.5 – Дотичні напруження міжшарового зсуву τ_{mR} , Па.



Малюнок 4.3.6 – Загальна абсолютна деформатична здатність фінального варіанту напруженого стану балону високого тиску оптимізованої геометрії
 U_{sum} , м.

Висновок

Роблячи висновок ґрунтуючись на основі досліджень ми знайшли найвигідніший варіант геометрії балону високого тиску.

Додатково маю змогу звернути вашу увагу на отримані значення протягом проведення експерименту.

1. Область що відповідає кришці найменш небезпечна для всіх варіантів.
2. Область еліптичних гофрів має 1,5 повторення графіків критерію міцності

Дослідження повторення графіків за гостротою вершин:

- Гострі – 01,10;
- Загострені – 3,9.

За рівномірністю розподілення значень критерію міцності:

- Нерівномірно: 01, 02, 05, 06, 09;
- Рівномірно: 03,04,07, 08, 10.

Рівномірність розподілу значень модифікованного критерію міцності вздовж меридіана є сутово лінійним і вимагає додаткового дослідження, але на даному етапі маємо зазначити, що чим більше у дослідях буде l – тим буде більш оптимізована структура.

Перелік використаних джерел

1. Алфутов Н. А. Розрахунок багатошарових пластин і оболонок з композиційних матеріалів / Н.А.Алфутов, П. А. Зінов'єв, Б. Г. Попов. - М.: Машинобудування, 1984. - 264 с.
2. Амбарцумян С. А. Загальна теорія анізотропних оболонок / С. А. Амбарцумян.- М.: Наука, 1974. - 448 с.
3. Амбарцумян С. А. Теорія анізотропних пластин / С. А. Амбарцумян.- М.: Наука, 1987. - 360 с.
4. Андреев Л. В. Стійкість оболонок при неосесиметричних деформації / Л. В. Андреев, Н. І. Ободан, А. Г. Лебедев. - М.: Наука, 1988. - 208 с.
5. Баженов В. А. Розрахунок композитних конструкцій з урахуванням розшарування / В. А. Баженов, М. А. Гоцуляк, А. Л. Оглобля, Ю. Л. Дінкевич, О. В. Геращенко. - К.: Будівельник, 1992. - 136 с.
6. Баженов В. А. Нелінійні задачі механіки багатошарових оболонок / В. А. Баженов, А. С. Сахаров, А. В. Гондла, С. Л. Мельников. - К.: НДІ Будмеханіка, 1994. - 264 с.
7. Болотін В. В. Механіка багатошарових конструкцій / В. В. Болотін, Ю. Н. Новачків. - М.: Машинобудування, 1980. - 375 с.
8. Ванін Г. А. мікромеханіки композиційних матеріалів / Г. А. Ванін. - К.: Наук. думка, 1971. - 304 с.
9. Васильєв В. В. Механіка конструкцій з композиційних-них матеріалів / В. В. Васильєв. - М.: Машинобудування, 1988. - 272 с.
10. Верещака С. М. Нелінійне деформування і стійкість багатошарових елементів конструкцій з дефектами структури: монографія / С. М. Верещака. - Суми: Вид-во СумДУ, 2009. - 286 с.
11. Галімов Ш. К. Уточнені теорії пластин і оболонок / Ш. К. Галімов. - Саратов: Изд-во Саратов. ун-ту, 1990. - 134 с.
12. Гріголюк Е. І. Багатошарові армовані оболонки: розрахунок пневматичних шин / Е. І. Гріголюк, Г. М. Куликов. - М.: Машинобудування, 1988. - 280 с.
13. Григоренко Я. М. Ізотропні і анізотропні шаруваті оболонки обертання змінної жорсткості / Я. М. Григоренко. - Київ: Наук. думка, 1973. - 228 с.
14. Григоренко Я. М. Завдання статички анізотропних не- однорідних оболонок / Я.М. Григоренко, А.Т.Васіленко. - М.: Наука, 1992. - 336 с.

15. Григоренко Я. М. Статика анізотропних товсто-стінних оболонок / Я. М. Григоренко, А. Т. Василенко, Н. Д. Панкратова. - К.: Вища шк., 1985. - 190 с.
16. Григоренко Я. М. Задачі теорії пружності неоднорідних тіл / Я. М. Григоренко, А. Т. Василенко, Н. Д. Панкратова. - К.: Наук. думка, 1991. - 216 с.
17. Гузь А. Н. Механіка руйнування при стискуванні композитних матеріалів / А. Н. Гузь. - К.: Наук. думка, 1990. - 630 с.
18. Гуляєв В. І. Некласична теорія оболонок і її додаток до рішення інженерних задач / В. І. Гуляєв, В. А. Баженов, П. П. Лізунов. - Львів: Вид-во при Львів. ун-ті, 1978. - 192 с.
19. Ісаханов Г. В. Міцність армованих пластиків і сіталов / Г. В. Ісаханов, А. Е. Журавель. - М.: Машино-будування, 1981. - 234 с.
20. Кантор Б.Я. Нелінійні задачі теорії неоднорідних пологих оболонок / Б. Я. Кантор. - К.: Наук. думка, 1971. - 136 с.
21. Кантор Б.Я. Контактні задачі нелінійної теорії оболонок обертання / Б. Я. Кантор // АН УРСР. Ін-т проблем машинобудування. - Київ: Наук. думка, 1990. - 135 с.
22. Кільчевський Н. А. Основи аналітичної механіки оболонок / Н. А. Кільчевський. - К.: Вид-во АН УРСР, 1972. - 354 с.
23. Композиційні матеріали: довідник / під ред. В. В. Васильєва та Ю. М. Тарнопольського. - М.: Машинобудування, 1990. - 512 с.
24. Корольов В. І. Шаруваті анізотропні пластинки і оболонки з армованих пластмас / В. І. Корольов. - М.: Машинобудування, 1965. - 272 с.
25. Крістенсен Р. Введення в механіку композитів / Р. Крістенсен - М.: Мир, 1982. - 334 с.