ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

Бакалець Дмитро Віталійович

Удосконалення ремонту рамних конструкцій засобів транспорту

Спеціальність: 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
Савуляк Валерій Іванович
доктор технічних наук, професор

Вінниця – 2015

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

НДС – Напружено-деформований стан

МСЕ – Метод скінченних елементів

ЕОМ – Електронно-обчислювальна машина

СВЧ – Струми високої частоти

ПК – Персональний комп'ютер

ППП - Пакет прикладних програм

КЕ – Кінцеві елементи

МКП – Міжкристалітне проникнення

ЗТВ – Зона термічного впливу

ВСТУП

Експлуатація засобів транспорту повсякчас поєднується з необхідністю протидії впливу як прогнозованих так і не прогнозованих навантажень. При цьому часто навантаження та відповідні внутрішні напруження концентруються на локальних ділянках, які характерні саме для цих умов експлуатації, схем агрегатування тощо. Тому нерідко на таких ділянках мають місце пошкодження у вигляді мікротріщин, деформацій та руйнувань. Досвід ремонту або підсилення таких ділянок рамних конструкцій засобів транспорту виявив такі проблеми:

– невизначеність розташування ділянок, які потребують більш ретельного діагностування під час технічного огляду засобів транспорту;

– недовговічність ділянок конструкцій рам, відновлених за відомими технологіями зварювання;

– виникнення нових тріщин та корозійних ушкоджень, як правило, на невеликій відстані від відремонтованої ділянки, виконаних, особливо, засобами зварювання;

– недостатність конкретних рекомендацій та технологій виконання робіт з підсилення або ремонту пошкоджених ділянок рам засобів транспорту з врахуванням конструктивних особливостей та умов експлуатації.

Аналіз робіт, виконаних у зазначеному напрямку, показав необхідність заповнення прогалин у дослідженнях процесів ремонту та підвищення ресурсу рам засобів транспорту, розробки на цій основі практичних рекомендацій та технологій відновлювальних та ремонтних робіт.

Актуальність теми. Проблема надійності рамних конструкцій актуальна для всіх видів транспорту. В Україні ця проблема особливо гостра: вантажні автомобілі, спецтехніка та сільськогосподарські машини працюють у важких рельєфних і кліматичних умовах, на жорстких підвісках, їх основні елементи, що сприймають навантаження, переважно виготовляються із сталі.

У більшості конструкцій засобів транспорту базовою збірною одиницею є рама, яка вносить до 40% вкладу металомісткості усього автомобіля і значно впливає на ресурс його роботи. Провідними факторами впливу на довговічність є пошкодження рами тріщинами та корозією.

Результатом недооцінки провідних факторів та процесів руйнування є використання нераціональних технологічних операцій виготовлення, технічного обслуговування та ремонту рамних конструкцій засобів транспорту.

Для підвищення рівня проектування процесів ремонту необхідні розробки більш досконалих методів розрахунку, які враховують реальні умови експлуатації та технологію виготовлення, переобладнання чи попереднього ремонту конструкцій. Особливо це стосується рам, виготовлених або відремонтованих з використанням процесів зварювання, яке викликає зміни структури та фізико-механічних властивостей матеріалу деталей. Ці зміни до цього часу мало враховуються під час розробки технологічних процесів ремонту засобів транспорту внаслідок недостатньої дослідженості цих питань, що часто призводять до непередбачуваних поломок.

Внаслідок дії в процесі експлуатації засобів транспорту статичних та динамічних навантажень на рами виникають тріщини та інші пошкодження на певних локальних ділянках. Окрім того, не виключене пошкодження рам засобів транспорту внаслідок аварій та інших екстремальних впливів. Ці ділянки рам вимагають ремонту, який переважно виконується шляхом встановлювання додаткових елементів підсилення приварюванням або вирізанням пошкоджених та вварюванням нових на їх місце.

Проблемою ремонту небезпечних зон рамних конструкцій шляхом встановлення елементів підсилення, а також відновлення таких зон із зародженими тріщинами, є небезпека пошкодження основного металу за рахунок негативних процесів, які можуть мати місце під час зварювання, як основного методу ремонту. До таких негативних факторів відносять потужні теплові поля від зварювальної дуги, напруження та деформації, що виникають при цьому тощо. Потужні теплові поля можуть викликати у зоні термічного впливу перерозподіл хімічних елементів та рекристалізацію матеріалу рамної конструкції. Тому дослідження в межах розв’язання означеної проблеми є актуальними. Розгляду цих актуальних проблем і присвячена дисертаційна робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі технології підвищення зносостійкості Вінницького національного технічного університету. Тема роботи відповідає основним науковим напрямкам кафедри і є логічним продовженням робіт, виконаних за цією тематикою. Дослідження проводились відповідно до госпдоговору між приватним акціонерним товариством «Гніванський завод СЗБ» та Вінницьким національним технічним університетом «Модернізація корпусу кінцевого захвата (обойми) під клин шириною 90 мм та його випробування» (номер державної реєстрації 0114U004604) та держбюджетних тем: «Наукові засади та реалізація явища контактного плавлення в інженерії поверхні та синтезі нових матеріалів» (номер державної реєстрації 0107U002090), «Матеріалознавчі аспекти відновлення та підсилення несучих металоконструкцій шляхом приварювання додаткових елементів із спеціальним профілем та властивостями». (номер державної реєстрації 0113U003136), де автор був виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є збільшення терміну експлуатації рамних конструкцій засобів транспорту шляхом удосконалення технологічних процесів ремонту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- розробка методики локалізації розташування та розмірів ділянок рам транспортних засобів з високою ймовірністю виникнення тріщин;

- наукове обгрунтування методики визначення параметрів накладок для ремонту та відновлення рам;

- розробка та обгрунтування технології ремонту дефектів лонжеронів рам методами зварювання;

- дослідження процесів формування полів температур, напружень та деформацій у матеріалі рам від процесів зварювання та їх впливу на експлуатаційні властивості металу;

- дослідження можливості підвищення якості ремонту рам шляхом поєднання процесів зварювання та високотемпературного паяння;

- розробка практичних рекомендацій щодо складу та раціональних параметрів операцій ремонту рамних конструкцій засобів транспорту.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси ремонту рамних конструкцій засобів транспорту.

Предмет дослідження – склад та раціональні параметри операцій ремонту рамних конструкцій засобів транспорту.

Методи дослідження. Теоретичні розрахунки здійснювались з використанням сучасних теорій теплопередачі, термопружності, матеріалознавства, фізики твердого та деформівного тіла, а також математичного моделювання фізичних процесів, які мають місце під час експлуатації рам транспортних засобів. Експериментальні дослідження реальної динаміки навантаження рами автомобілів з гідроманіпулятором проводились в натурних умовах експлуатації. Визначення характеристик тріщиностійкості матеріалу рами проводились у лабораторних умовах на експериментальній установці з модулятором циклічних навантажень. Експерименти здійснювались з використанням сучасних вимірювальних засобів (осцилограф, оптичний мікроскоп МИМ-8, електронний мікроскоп РЕММА-106И, приладів та інструментів для реєстрації параметрів досліджуваних процесів (температури, геометрії, структури). Побудова математичної моделі та розрахунки проводились із застосуванням сучасного програмного забезпечення (“Mathcad”, “КОМПАС”, “Abaqus ”, “Ansys”).

Наукова новизна одержаних у роботі результатів, які виносяться на захист:

– отримала подальший розвиток методика діагностування рами транспортного засобу, за якою на першому етапі моделюванням, з використанням кінцевоелементного аналізу та врахуванням умов експлуатації, локалізуються ділянки з напруженнями, які перевищують допустимі, а потім інструментальними засобами дефектування визначається наявність пошкоджень;

– вперше встановлено можливість зменшення величини та нерівномірності внутрішніх напружень та деформацій, що виникають в деталях рами під впливом операцій ремонту, шляхом раціонального вибору параметрів накладок для підсилення та режимів їх встановлення;

– вперше доведена можливість підвищення якості ремонту рам з використанням зварювання, як основного методу усунення пошкоджень, шляхом його поєднання з високотемпературним паянням, яке використовує тепло процесу зварювання.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується достатнім обсягом експериментальних даних, отриманих з використанням комплексу сучасних методів досліджень, котрі є взаємодоповнюючими, статистичною обробкою даних, позитивних результатів стендових випробувань відремонтованих елементів і експлуатаційних випробувань відремонтованих рам засобів транспорту.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена технологія пропонується для використання під час ремонту рам засобів транспорту (автомобілів, залізничної, сільськогосподарської та будівельно-дорожної техніки, тощо), а також для підсилення рам з метою попередження руйнувань від додатково встановленого обладнання або від особливих факторів навантаження.

Запропонована інженерна методика і отримані результати дають змогу провести попередню оцінку міцності конструкцій рам, ушкоджених тріщинами, визначити інші зони з найбільшою ймовірністю появи тріщин та оптимальні параметри накладок для їх підсилення. Розроблена методика приварювання елементів підсилення забезпечує мінімізацію теплових напружень та деформацій в зоні термічного впливу і дозволяє мінімізувати залишкові напруження, що значно зменшує загрозу раптового руйнування конструкції рами.

Дослідні випробування та експлуатація протягом 4 років (біля 300 тис. км. пробігу) показали, що розроблена технологія забезпечує високу міцність відремонтованих конструкцій.

На основі проведених досліджень поставлено та розв’язано задачу ремонту поперечних тріщин рам засобів транспорту з урахуванням особливостей умов їх експлуатації.

Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі для підготовки фахівців за спеціальністю: 7(8).07010601 – «Автомобілі та автомобільне господарство», під час викладання дисципліни «Основи технології виробництва та ремонту автомобілів» в змістовому модулі «Технологічні основи ремонту автомобілів» впроваджено методику визначення параметрів підсилюючих накладок для ремонту рамних конструкцій; 7(8).05050403 – «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій», під час викладання дисциплін:

«Діагностика матеріалів, конструкцій та якості покриттів» в лекціях: «Діагностика просторових рамних конструкцій» та «Інноваційні методи і технології в галузі діагностики та дефектоскопії», а також під час проведення лабораторної роботи на тему: «Кінцево-елементний аналіз, як засіб діагностування» використано запропоновану в дисертаційній роботі методику визначення розташування та розмірів ділянок рам з високою ймовірністю виникнення пошкоджень;

«Реноваційні технології зварювання» в змістових модулях: «Дефекти металоконструкцій транспортної техніки та технологічних машин» та «Технологічні особливості проведення реноваційних заходів» використано запропоновану в дисертаційній роботі технологію ремонту рам шляхом поєднання процесів зварювання та високотемпературного паяння.

Впровадження результатів дозволяє підвищити якість навчання студентів з питань забезпечення довговічності машин та їх відновлення (Додаток А).

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати досліджень за темою дисертаційної роботи автором отримані самостійно. Постановка задач та обговорення результатів досліджень виконано спільно з науковим керівником. У працях, опублікованих у співавторстві, особисто автором розроблені алгоритми та розраховані НДС рам; розроблено методику та побудовані поля температур, напружень і деформацій в матеріалі під час зварювання; обґрунтовано технологію та визначено оптимальні параметри процесу приварювання ремонтних накладок на лонжерони рам транспортних та технологічних машин; запропоновано методику вибору техніки зварювання та форми накладок для підсилення, обґрунтовано доцільність ремонту рам транспортної техніки з ураженими поперечними тріщинами лонжеронами зварюванням з супутнім паянням.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати виконаних в дисертації досліджень доповідались та обговорювались на Всеукраїнській науково-практичній конференцій студентів та аспірантів «Підвищення надійності машин і обладнання» (Кіровоград, 2008, 2009, 2012, 2013). Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології» (Київ, 2009); XXI відкритій науково-технічній конференції молодих науковців і спеціалістів «Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи» (Львів, 2009); міжнародній науково-технічній конференції «Теоретичні і прикладні задачі обробки матеріалів тиском та авто технічних експертиз» (Вінниця 2011); IV міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (Вінниця 2011); Міжнародній науково-технічній конференції «Університетська наука – 2012» (Маріуполь), III міжнародній науково-технічній конференції «Зварювальне виробництво в машинобудуванні:

перспективи розвитку» (Краматорськ 2012); III міжнародній науково-практичній конференції «Науково-прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузей» (Луцьк-Світязь 2014р.); науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів Вінницького національного технічного університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області (2008-2014);

В повному обсязі робота доповідалась та отримала позитивні відгуки на засіданнях науково-технічних семінарів у Вінницькому національному технічному університеті, Приазовському державному технічному університеті, Донбаській державній машинобудівній академії та Національному транспортному університеті.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 17 працях, з них: 6 статтей у фахових виданнях України, в т.ч. 2 статті у виданнях, що включені до міжнародної наукометричної бази РИНЦ; одна стаття у закордонному періодичному виданні; матеріали 2-х міжнародних науково-технічних конференцій; 7 тез науково-технічних конференцій, отримано патент на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п’яти розділів, загальних висновків, переліку використаних літературних джерел із 127 найменувань та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 176 сторінок, в тому числі 135 сторінок основного тексту 88 рисунків, та 8 таблиць

РОЗДІЛ 1
СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ З ПРОБЛЕМ ПІДТРИМАННЯ СЛУЖБОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАМНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ

1.1 Аналіз рамних конструкцій засобів транспорту та типових ушкоджень

У зв’язку з надзвичайно великим різноманіттям транспортної техніки аналіз конструкцій несучих рам мобільних машин доцільно виконувати з врахуванням їх можливих варіантів виготовлення [1-3]: лонжеронні, периферійні, хребтові, вильчато-хребтові, з несучою основою, решітчасті, інтегровані в кузов (Frame-in-body, UniFrame).

Як несуча конструкція системи вантажного автомобіля найчастіше застосовується лонжеронна та, рідше, хребтова рама [3]. Лонжеронна рама об'єднує дві поздовжні балки (лонжерони) і поперечки, що знаходяться між ними. Залежно від типу автомобіля лонжерони можуть встановлюватися:

паралельно в горизонтальній площині;

під кутом в горизонтальній площині;

вигнутими у вертикальній площині;

вигнутими в горизонтальній площині.

Паралельна схема лонжеронної рами застосовується, в основному, на вантажних автомобілях. Решта схем використовуються на легкових автомобілях підвищеної прохідності – позашляховиках [2].

Лонжерон являє собою металеву балку відкритого або закритого поперечного перетину (закритий короб, швелер, двотавр), що має велику жорсткість на згин.

Хребтові та вильчато-хребтові несучі конструкції рам притаманні комбайнам та іншим складнопросторовим машинам.

Решітчасті несучі конструкції використовують здебільшого для виготовлення кузовів автобусів, трамваїв, тролейбусів тощо.

На сьогоднішній день встановлено велику різноманітність лонжеронних рам драбинного типу, представниками яких є рами автомобілів загального призначення та рами сідельних напівпричепів (рис.1.1) – конструктивні системи із тонкостінних стрижнів. Рами автомобілів відчизняного виробництва [2] клепані, складаються з двох повздовжніх балок швелерної форми зі змінним перетином, виготовлених зі смугової низьколегованої сталі товщиною до 8 мм. Повздовжні балки рами виготовлені методом гарячого штампування і мають найбільшу висоту перерізу 265 мм, а ширина полиць змінюється від 60 до 80 мм. По довжині поздовжні балки з'єднані в декількох місцях поперечками за допомогою заклепок. На повздовжніх балках прикріплені кронштейни передньої, задньої і додаткової ресор, кронштейни бічних опор двигуна, кріплення кабіни, рульового керування та ін.

а) б)

Рисунок 1.1 – Типові рами:

а) сучасних вантажних автомобілів; б) сідельних напівпричепів

Рама сучасних автомобілів КрАЗ являє собою просторову конструкцію, що складається з двох поздовжніх лонжеронів, пов'язаних між собою п'ятьма поперечинами [4]. Лонжерони виготовляють з гарячекатаного швелера № 30 (матеріал швелера – сталь 15ХСНД). Поперечки рам автомобілів КрАЗ штамповані і штампо-зварні з сталі 15 товщиною 8 мм, за винятком п'ятої поперечки автомобіля КрАЗ-255Б, яку виготовляють з швелера Л 30 (матеріал-сталь 15ХСНД).

Рами сідельних напівпричепів та більшості сучасних вантажних автомобілів є суцільно зварними і можуть мати найрізноманітніші форми та розміри (див. рис. 1.1) [1]. Рама напівпричепа складається з двох довгих вигнутих балок (лонжеронів), виконаних у вигляді двотавра зі змінною висотою, пов'язаних між собою поперечинами (траверсами).

Лонжерони сідельних напівпричепів зарубіжного виробництва можуть мати різні розміри, форму, металоємність і, відповідно, масу, проте всі вони являють собою таври змінного перерізу висотою до 41,5 см, і виготовлені зварюванням з листового металу товщиною від 4 до 16 мм.

Різні виробники для своїх конструкцій використовують різні марки сталей. Так, наприклад, зварні рами напівпричепів Kögel виробляються зі сталі марки StE 460 [5]. Буква Е в назві марки вказує на виплавку сталі в електропечі, що гарантує малу кількість шкідливих домішок (фосфору – до 0,035%, сірки – до 0,03%), а цифра – це межа текучості в МПа. Згідно стандарту, така сталь містить 0,2% вуглецю, 0,1 ... 0,6% кремнію, 1 ... 1,7% марганцю, близько 1% нікелю і 0,3% хрому. При такому складі крихкі структури при зварюванні не утворюються, а нікель ще й зменшує схильність сталі до крихкого руйнування [6]. Але основним є те, що така сталь містить певну кількість (соті частини відсотка) ванадію, молібдену, ніобію і азоту, завдяки чому утворюються дрібні частинки стійких хімічних сполук цих елементів з вуглецем і азотом (карбонітриди), які стримують зростання зерна [7]. Ця група іменується як «сталь з карбонітридним зміцненням», оскільки через подрібнення зерна і присутність дрібних частинок істотно (на 30 ... 35%) збільшується їх міцність. Це дає можливість, у деяких випадках, відмовитися від проведення зміцнювальної обробки – потрібні властивості можуть бути досягнуті безпосередньо після прокатування завдяки прискореному охолодженню.

Така сталь має ще одну перевагу – вона спадково дрібнозерниста, тобто при повторному нагріванні до високих температур зерно росте дуже повільно і після охолодження залишається дрібним. Тому її використання для зварних з'єднань сприяє збереженню властивостей в зоні термічного впливу і зменшенню виникнення тріщин.

1.2 Методики розрахунку забезпечення службових та експлуатаційних характеристик рамних конструкцій засобів транспорту

Традиційно аналіз міцності і жорсткості рам вантажних автомобілів ґрунтувався на методах опору матеріалів та будівельної механіки стрижневих систем. Найпростішим підходом до визначення напружено-деформованого стану (НДС) рам є розрахунок рами як статично невизначеної балочної конструкції [8–9].

Використання цього методу дозволяє дуже наближено визначити лише інтегральні характеристики жорсткості, а також параметри загального напруженого стану рам при вигині. При крученні балкові моделі застосовні лише для досить жорстких на кручення рам, що мають лонжерони і поперечки закритого перетину. Для наближеної оцінки параметрів НДС рами, що працює на кручення (якими є рами більшості сучасних дорожніх вантажних автомобілів з відкритим перерізом лонжеронів і поперечин), можна скористатися методом В. З. Власова [10], яка враховує вплив ефекту стиснутого кручення на напружено-деформований стан рами. В подібних рамах крутильна жорсткість забезпечується переважно за рахунок дії нормальних напружень, що виникають внаслідок стиснення депланацій у «вузлах» рами, тобто місцях з'єднання лонжеронів з поперечиною. Більш сучасна методика розрахунку рам [11], яка заснована на підході В. З. Власова, дозволила з достатньою точністю аналізувати НДС тільки плоских рам, всі елементи яких мають однакову висоту. Крім того, при обчисленні за цим методом виникають певні складнощі, які пов'язані з високим ступенем статичної невизначеності розрахункової моделі. Як додаткові статично невизначені величини виступають бімоменти у вузлах рами. В роботі [12] зазначений метод характеризується як метод розрахунку рам з контуром поперечного перерізу, що деформується. У другій половині 20-го сторіччя знайшли використання алгоритми розрахунку рам з припущенням, що контур поперечного перерізу є жорстким [13, 14], що дозволило істотно зменшити ступінь статичної невизначеності моделі рами і охопити ширший спектр варіантів конструкції. При цьому, в якості критерію «жорсткості» або «недеформуємості» контуру висувалася відсутність деформацій вигину в поперечках рами і наявність досить великої кількості поперечок (відстань між поперечинами не повинна бути більше, ніж 10-кратна висота лонжерона). Всі перераховані підходи при дослідженні кручення рам дозволяли наближено визначити лише інтегральні характеристики жорсткості. Іншими словами, балкові і стрижневі розрахункові моделі і методи, незалежно від використовуваних гіпотез, дозволяли досліджувати НДС рами тільки в конструктивно однорідних зонах, далеко від місць з'єднань лонжеронів і поперечин рам («вузлів»), де вони практично не давали коректних результатів. Проте, зазначені підходи [15–38] інтенсивно розвивалися різними вченими і дослідниками.

Надалі, з появою методу скінченних елементів (МСЕ) і впровадженням його в розрахункову практику поряд з використанням ЕОМ, стали з'являтися моделі, що значно удосконалили класичні. Так, В. Ю. Апанович [15] використовував для розрахунку рам вантажних автомобілів стрижневі моделі, що враховують ексцентриситет в з'єднаннях елементів, а також змінну жорсткість елементів рами.

Змішані моделі для розрахунку автомобільних рам активно розвивав H. J. Beermann [16–18], який представляв поперечки і ділянки лонжеронів рам між «вузлами» як тонкостінні стержні, а «вузли» рам моделював за допомогою МСЕ у варіанті методу сил. Досліджувався вплив податливості вузлів на крутильну жорсткість і напружений стан рам вантажних автомобілів з лонжеронами і поперечинами відкритого перетину. В останній час широке застосування знайшли оболонкові моделі. Моделювання вузлів рами МСЕ з використанням оболонкової моделі дозволило не тільки більш точно визначити жорсткість рами на кручення, а й обчислити напруження у вузлах рами. Комбіновані методи виявилися досить зручними для дослідження різних варіантів конструктивного виконання вузлів рами. В [19] враховувався вплив кузова вантажного автомобіля на жорсткість несучої системи при крученні, особливо для випадків податливих рам. Показано вплив поперечки замкнутого перетину, а також способу її кріплення, на крутильну жорсткість рами. Для лонжеронів відкритого перетину (двотавр) і поперечок закритого перетину домінуючими видами деформацій є вигин лонжеронів і кручення поперечок.

H. Oehlschlaeger [20] досліджував рами вантажних автомобілів з відкритим профілем лонжеронів і поперечин з використанням змішаного методу. З використанням МСЕ (метод сил) досліджувалися різні способи з'єднання лонжеронів і поперечин рами і вплив податливості «вузлів» на напружений стан лонжеронів і поперечин. Було показано, що розмір зон, які необхідно моделювати за уточненими методами, практично збігається з розмірами «вузлів» рами. В роботі [20] запропоновано спосіб врахування отворів в поперечках рами, призначених для полегшення конструкції, при розрахунку рами на кручення. Податливість поперечки з отворами визначалася за МСЕ, як і податливість «вузлів» рами, а далі використовувався змішаний метод. Показано, що зазначені отвори, хоча і підвищують загальний рівень напружень в поперечині, не є істотними концентраторами напружень. Вплив отворів на загальну жорсткість рами також є незначним.

В. Ю. Апанович [15] також розробляв комбіновані оболонково-стрижневі кінцевоелементні моделі рам, в яких регулярні зони лонжеронів і поперечин моделювалися елементами тонкостінного стрижня, а «вузли» рами – елементами оболонки. Проблема спряження стрижневих і оболонкових елементів здійснювалася за допомогою спеціально розробленого алгоритму.

А. І. Голованов, В. В. Нехотяев [21] на підставі результатів експериментів показали, що характер деформування елементів рами великовантажного автомобіля відповідає, в основному, алгоритму на основі тонкостінних стрижнів В. З. Власова. Для аналізу загального НДС рам автомобілів вони також використовували змішані моделі. Моделювання «вузлів» рами здійснювалося за результатами розрахунково-експериментальних досліджень рами, а для лонжеронів і поперечин використовувалася модель тонкостінного стрижня.

Значний внесок у вивчення рамних автомобільних конструкцій внесли розрахункові та експериментальні дослідження, що проводилися В. Н. Белокуровим, М. Н. Заксом, А. А. Захаровим [22–28]. Крім того, В. Н. Белокуров і А. А. Захаров досліджували вплив надбудови автомобіля (зокрема, самосвальної платформи та надрамника) на інтегральну жорсткість несучої системи. C. J. Cooke [30] також досліджував вплив різних конструктивних рішень кузова на інтегральну жорсткість несучої системи.

Розвиток змішаних методів дослідження рамних конструкцій пояснювався в першу чергу їх економічністю. Використання більш точних (оболонкових) моделей для розрахунку рам в 1980-ті роки було можливо тільки в великих дослідницьких центрах, що мали доступ до значних обчислювальних ресурсів. Водночас, практичні конструктори і проектувальники таких ресурсів не мали.

При економічності змішаних методів їм притаманні два істотні недоліки. По-перше, як зазначалося вище, вони не дозволяли досліджувати локальний НДС рами в зонах конструктивної неоднорідності (в першу чергу, у вузлах рами), які є найбільш навантаженими зонами рами. По-друге, використання змішаних методів потребує високої кваліфікації проектувальника не тільки як інженера, але і як механіка і математика.

Подальший розвиток методів розрахунку рам пов'язаний, з одного боку, зі стрімким зростанням обчислювальних можливостей ЕОМ, у тому числі і персональних, і, з іншого боку, з розвитком і впровадженням у розрахункову практику чисельних методів розрахунку (в першу чергу, методу скінченних елементів, який дозволяє досліджувати характеристики жорсткості і міцності досить складних конструкцій), а також методів обчислювальної геометрії і тривимірного моделювання.

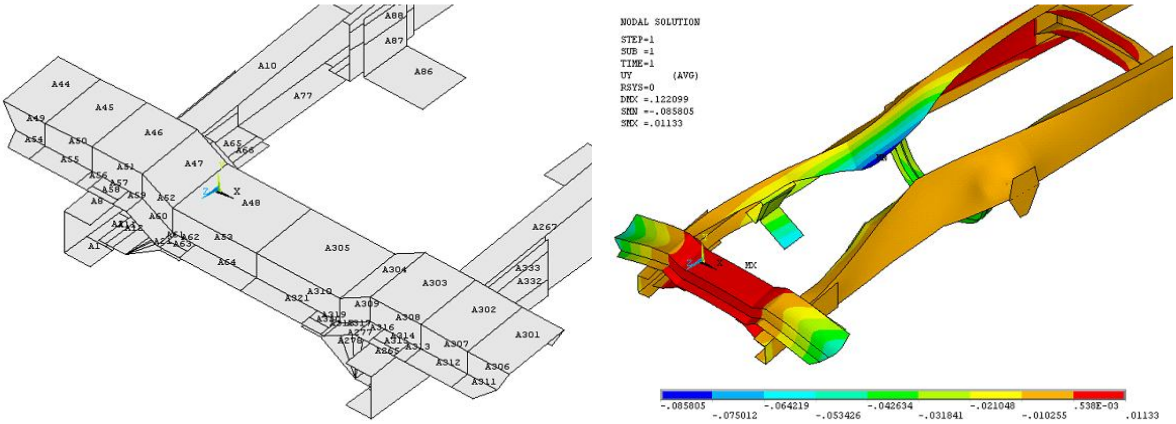
Одним з перших математиків, які застосували МСЕ, був Курант. У 1943 році він опублікував наближений метод розв'язання задачі кручення Сен-Венана, використовуючи лінійну апроксимацію функції напружень всередині кожного з сукупності трикутних елементів [31]. Історично першими роботами з використання МКЕ в задачах розрахунку інженерних споруд є статті Аргіріса і Келсі [32, 33].

В даний час опублікована значна кількість робіт, пов'язаних з розвитком і використанням МСЕ. З основами методу і його технічних додатків можна ознайомитися в книгах Зенкевича [34], Галлагера [35], Сегерлінда [36], Батте і Вілсона [37], Норрі і де Фріза [38]. Варіаційні принципи, на яких грунтується більшість формулювань МСЕ, детально викладені в книзі Васідзу [39].

Моделювання рами автомобіля, як тонкостінної оболонкової конструкції, є наслідком впровадження МСЕ в розрахункову практику. Однак, завдання аналізу оболонкових конструкцій є одним з найбільш складних класів задач механіки деформування і МСЕ. Висока алгоритмізація, формалізація і відносна простота розрахунків тонкостінних оболонкових конструкцій не позбавляє від складності отримання достовірних результатів.

В даний час значний розвиток фундаментальних питань МСЕ і зростання обчислювальних можливостей ЕОМ привели до появи комерційних програмних комплексів, що реалізують МСЕ. При цьому, можливості сучасних ЕОМ, навіть персонального класу, дозволяють вирішувати завдання дуже великої розмірності (понад 500 тис. невідомих) [40-42].

Один із таких комплексів використано авторами [42] для оцінки НДС автомобіля КамАЗ-5410. Зазначений комплекс автори використали для визначення розподілу напружень, що виникають у окремих елементах конструкції і деформацій рами автомобіля, від навантажень та схеми їх прикладання (рис. 1.2).



а) б)

Рисунок 1.2 – Фрагмент моделі рами автомобіля КамАЗ-5410:
а) набір складових площин; б) ізополя переміщень в поперечному напрямку

Однак, отримані авторами результати по найбільших переміщеннях компонентів рами від максимального завантаження, яке, за їх підрахунками, склало 0,085 ... 0,09 мм, ставлять під сумнів коректність моделі. Причиною могло, наприклад, стати те, що уся конструкція рами змодельована як набір складових площин, що виготовлені з листової сталі (див. рис. 1.2 а), а усі округлення елементів не враховувались.

Експериментальні дослідження рам великовантажних автомобілів проводилися за участю співробітників ВАТ КАМАЗ [43].

Таким чином, МСЕ стає інструментом не тільки вченого-дослідника, а й практичного конструктора. Однак, у останнього часто створюється ілюзія тривіальності отримання коректних результатів у силу високого ступеня формалізації та автоматизації, а також уявної простоти процесу підготовки вихідної інформації комерційних програмних комплексів. Насправді ж, методичні помилки, допущені на стадії підготовки моделі і, особливо, при задаванні силових і кінематичних граничних умов, можуть призвести до результатів, що суперечить не тільки реальним параметрам досліджуваного об'єкта, а й здоровому глузду. Відсутність або дуже обмежена кількість методичних розробок з питання дослідження НДС реальних складних конструкцій сприяє зростанню числа подібних помилок. Таким чином, досить актуальним стає дослідження методичних аспектів використання МСЕ для аналізу складних конструкцій, якими є рами автотранспортних засобів.

1.3 Аналіз досліджень процесів руйнування рамних конструкцій засобів транспорту

В даний час інтенсивно розробляється питання оптимізації рам шляхом зменшення їх маси за рахунок зменшення товщини матеріалів, що використовуються для їх виготовлення, та оцінці НДС рам під час експлуатації.

Так у роботі [44] проведено оцінку рам напівпричепів, призначених для перевезення цистерн, з використанням програм кінцевоелементного аналізу. Автори обґрунтували можливість зменшення металоємкості рами напівпричепа на 27,2% за рахунок товщини поздовжніх та поперечних балок. Проте, у цих дослідженнях автори враховувати лише статичні навантаження, що не зовсім коректно по відношенню до автомобільного транспорту.

Світовий досвід експлуатації показує, що такі послаблення рам неминуче призводять до їх вигину під час експлуатації (рис. 1.3).

Рисунок 1.3 – Вигин рами

На нашу думку, на даному етапі розвитку машинобудування зменшення металоємкості конструкцій можливе шляхом використання більш вартісних та якісних матеріалів, як це роблять деякі відомі виробники [45, 46]. Інший більш прогресивний спосіб підвищення або відновлення (після поломки) експлуатаційних характеристик можливий за рахунок зміни профілів (перерізів) основних несучих елементів рам як на етапі виробництва, так і в процесі експлуатації [47].

Дослідження процесів руйнування, ремонту та підсилення рамних конструкцій транспортної техніки знайшли своє відображення в широкій серії наукових праць вчених: О. П. Кравченка, В. П. Сахна, В. Г. Проскурякова, Л. М. Лельчука, А. В. Александрова, В. В. Панасика, І. Г. Грабара, В. Є. Титаренка [46–62].

Рама автомобіля під час експлуатації з одного боку зазнає впливу високих, безперервних і різноспрямованих динамічних навантажень, що передаються від тягово-зчіпного пристрою [48], з іншого – навантажень від нерівностей дороги, що передаються від колісної групи. Ці процеси нерідко відбуваються в хімічно агресивному середовищі під вагою, часто нерівномірно розміщеного, вантажу. Численні конструкторські розробки мають на меті дотримання необхідного балансу між низькою вагою і високою міцністю, а також гнучкістю і жорсткістю [49, 50]. Дуже гнучка рама схильна до зайвих згинань всієї конструкції і поломок, дуже жорстка рама навпаки – до більш інтенсивного руйнування її елементів та підвіски. Конструкторські пошуки в розробці рам напівпричепів спрямовані на максимально можливе зменшення собівартості матеріалів та технологій їх виготовлення. Найбільш складні та небезпечні поломки напівпричепів пов’язані з ушкодженнями несучої частини.

Для металоконструкцій різного призначення не вдається забезпечити рівномірність навантажень на всі ділянки. Експлуатаційні навантаження зумовлюють протікання в матеріалах процесів деградації та руйнування [51, 52]. Окремо потрібно звернути увагу на те, що різні ділянки протидіють також і різним видам деформації – згину або скручування та їх поєднанню [52]. Наслідком є різна швидкість вичерпування ресурсу та появи руйнувань. При цьому, зруйнованим виявляється невеликий відсоток конструкції, а решта має ще значний запас довговічності [53]. Актуальним є завдання виявити ділянки конструкції з найменшим ресурсом вже на етапі проектування та підсилити їх, а в процесі експлуатації відновити працездатність шляхом встановлення підсилюючих елементів або заміни окремих деталей. Найбільш придатними для виконання цих завдань, як показала практика, є зварювання та споріднені технології [54].

Процес, що передує руйнуванню, відбувається повільно, але швидкість розвитку пошкоджень прогресивно зростає. Довговічність деталі з тріщинами в середньому може становити від 10 до 80% загальної довговічності [55]. Поломка деталі відбувається раптово, при досить малих залишкових деформаціях, що робить дуже небезпечним руйнування.

В сучасній механіці твердого тіла існує багато формул [55-60] визначення швидкості розповсюдження втомної тріщини в металах і сплавах в залежності від умов навантаження, дії зовнішнього середовища тощо. Але, як показує практика, проблема руйнування конструкційних матеріалів настільки складна, що не завжди можливе формальне використання математичних розрахункових методів, основаних на теорії пружності і опору матеріалів. Це стосується проведення ремонтних зварювальних робіт, що призводять до зміни структури металу в зоні швів, які впливають на величину та знак внутрішніх напружень в сплаві, змінюють показники міцності.

На підставі численних досліджень [58, 59] встановлено, що процеси втомного руйнування протікають за різними механізмами в залежності від природи матеріалу, виду зміцнення, умов навантажень, і обумовлені утворенням дефектів і пошкоджень в локальних об’ємах матеріалу.

Важливу роль у розвитку втомних руйнувань металоконструкцій відіграє середовище та його корозійні властивості щодо металів та сплавів, з яких виготовлені металоконструкції [61, 62]. Початкова локалізація процесу втомного руйнування спричинена існуванням на поверхні металів неоднорідностей чи включень, що зумовлює утворення локальних корозійно-активних ділянок. Наслідком цього є зародження корозійно-механічних пітингів та виразок, які слід розглядати як потенційні концентратори напружень [61]. Вирішальна роль на цьому початковому етапі корозійного руйнування відводиться електрохімічним процесам, що активуються механічними напруженнями.

Другий етап руйнування матеріалу характеризується утворенням від вже існуючих пітингів перших тріщиноподібних дефектів, так званих фізично коротких тріщин – тріщин, довжина яких практично не перевищує відстані між головними мікроструктурними бар'єрами. На цьому етапі процесу втомного руйнування зростає роль механічного фактора. Подальший перебіг процесу корозійно-механічного руйнування призводить до розвитку та злиття мікротріщин. Після цього формуються магістральні тріщини, які розвиваються переважно в глиб матеріалу [63]. Досягнення ними критичних розмірів призводить до катастрофічного руйнування елемента конструкції. Слід зауважити, що для конкретного конструктивного елемента залежно від його геометричних розмірів та умов експлуатації властива своя лімітуюча стадія процесу втомного руйнування [63].

Під впливом великої кількості циклів змінного навантаження в найбільш навантаженому або послабленому місці металу зароджується та розвивається тріщина і утворюється ділянка втомного руйнування. При багатоцикловому навантаженні метал деталі більше чутливий до різноманітних концентраторів: дефектів на поверхні, підрізів (наприклад, на зварювальних швах), ділянок корозії. Процеси втомних пошкоджень переважно починаються з поверхневого шару.

Дослідженню втомних тріщин в рамних конструкціях засобів транспорту присвячено багато робіт відомих науковців: В. С. Гурмана, М. І. Підгурського, В. Б. Проскурякова, Л. М. Лельчука, В. В. Панасюка [64–68] та інших. Ними доведено зв'язок руйнування з видом експлуатаційних навантажень. Наведена в роботах статистика вказує на втомні руйнування як лонжеронів, так і поперечин автомобілів вітчизняного виробництва. На автомобілях бортових і самоскидах [64] встановлені втомні руйнування тільки лонжеронів. При крученні лонжеронів руйнуються поперечини рам, а руйнування лонжеронів викликається згинальними циклічними навантаженнями.

Дослідження автомобілів [65], що експлуатувалися в умовах доріг Житомирщини з орієнтовним пробігом $8 \cdot 10^5$ км виявили тріщини критичних розмірів, що в загальних рисах відповідають результатам роботи [58].

Втомні тріщини критичних розмірів утворились в нижній частині об’ємного каркаса автобуса ЛАЗ в місцях з'єднання закритих прямокутних профілів, приблизно при такому ж пробігу (рис. 1.4).

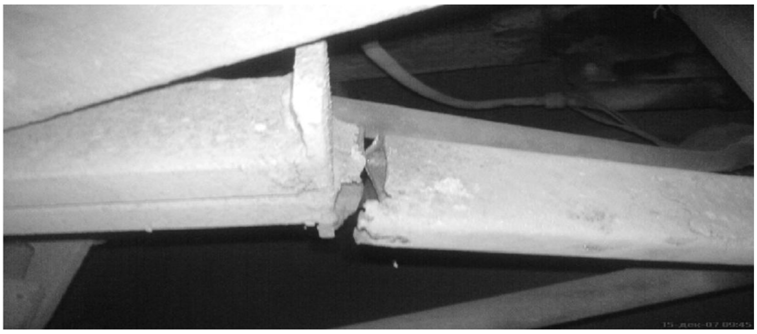


Рисунок 1.4 – Тріщини в горизонтальній частині об'ємного каркаса автобуса ЛАЗ

На основі багатьох порівнянь і співставлень [58–61] встановлено, що загальними причинами, основними факторами впливу на розвиток тріщин є процеси коливальної динаміки (найчастіше вертикального напрямку). В зв'язку з цим, пропонується вимірювати відносні вертикальні переміщення точок рамного контуру в процесі експлуатації транспортного засобу для встановлення імовірнісних місць розвитку втомних руйнувань.

Експериментальні дослідження НДС згину та згину з крученням проводились [66-68] на натурних зразках рам, що сприймають основні навантаження і є основою експериментальної установки (рис. 1.5). Результати експерименту згину з крученням рам показали, що критичні перерізи при крученні рамного контуру знаходяться в місцях з`єднання поперечин з лонжеронами та визначаються напруженнями зневоленого кручення σ_ω , які виникають від сил стримування вільної депланації кінцевих перетинів поперечин вертикальними стінками лонжеронів.

Встановлена також переважаюча роль в рамі згинної жорсткості лонжеронів та крутної – поперечин (90% навантажень згинання сприймаються лонжеронами, а біля 90% навантажень кручення – поперечинами).

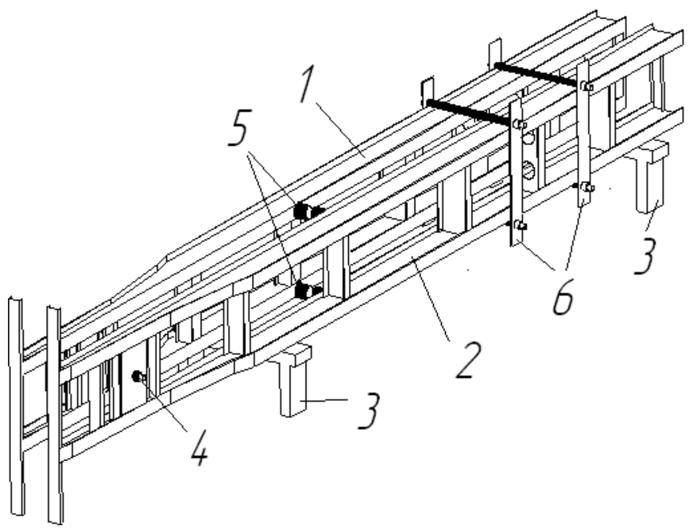


Рисунок 1.5 – Схема експериментальної установки:
1, 2 – основи рам; 3 – паралельні підкладки; 4 – з'єднувальний стрижень;
5 – гідравлічні силонавантажувачі; 6 – з'єднувальні пристрої

В роботі [68] також експериментально відслідкована послідовність накопичення тріщин на внутрішньому та зовнішньому боках вертикальної стінки лонжерона. Ці результати заслуговують певної уваги, оскільки дають розуміння щодо характеру та напрямку руйнування досліджуваних зон, проте їх не можна узагальнити і поширити на усі конструкції через їх велику різноманітність.

Останніми роками велика увага приділяється питанням розробки конструкцій несучих систем автомобілів з позиції мінімальної металоємності і раціонального використання міцності властивостей матеріалу елементів рами і вузлів. Щоб забезпечити достатній ресурс металоконструкції несучої системи автомобіля, зокрема рами, максимально знизивши її металоємність без шкоди для міцності, конструктори використовують розрахункові схеми та методи, які мають високий ступінь деталізації і відображають основні особливості експлуатації несучих конструкцій [69]. Для проведення досліджень використовують експериментальні методи визначення реального напруженого стану в окремих точках металоконструкції рами. Так, у роботі [69] дані про напружений стан металоконструкції визначали за допомогою первинних перетворювачів, що відображають реальну картину деформацій і напружень в результаті експлуатації рами напівпричепа (рис. 1.6).

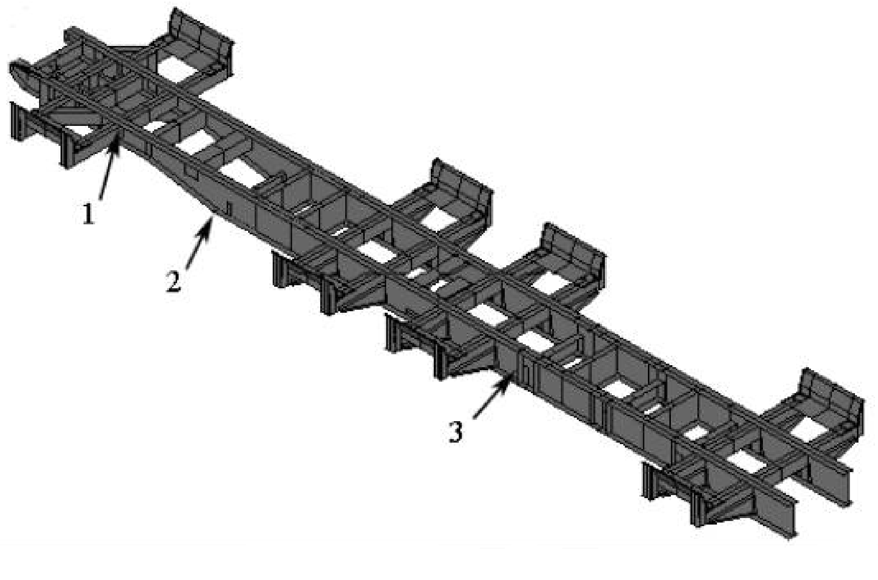


Рисунок 1.6 – Рама напівпричепа

Предметом дослідження є двовісний напівпричіп-платформа, призначений для перевезення одного 40-футового або двох 20-футових контейнерів типу 1AA і 1CC або одного 20 футового контейнера (повною масою 30 тонн), територією порту з сідельними тягачами: Терберг, Оттава, Мафі, МАЗ та ін. На підставі багаторічного досвіду експлуатації рами напівпричепа, автори виявили найбільш небезпечні вузли (поз. 1–3, рис. 1.6), в яких були наклеєні розетки первинних перетворювачів.

Проте автором [69] не взяті до уваги деякі моменти (напруження і деформації різні по всьому перерізі), які, на нашу думку, повинні враховуватись в дослідженнях такого плану.

Всього досліджували три вузла: стінка поперечини в місці примикання до лонжерона; нижня полиця лонжерона, де виникають максимальні напруги; стінка лонжерона в місці кріплення задньої підвіски. У таблиці 1.1 представлені результати кінцево-елементного аналізу та експерименту при повному циклі роботи рами, при навантаженні, транспортуванні і знятті контейнера.

Таблиця 1.1 – Еквівалентні напруження у досліджуваних точках

	Еквівалентні напруження у вузлах, МПа		
	Т.1	Т.2	Т.3
Початок завантаження	0,4	3	2,3
удар	6,1	20,2	11,3
кінець завантаження	5,8	18	8
старт	5	21,8	7,8
Правий поворот на 180˚	3	14,5	4,6
зупинка	4,3	16,3	6
старт	3,5	21,1	9,7
Правий поворот на 180˚	5	12,8	2,7
лівий поворот на 180˚	4,1	23,2	12,7
лівий поворот на 180˚	5	22,4	12,9
зупинка	5,6	18	10
Зняття контейнера	0,5	1	3

Отримані дані не дають повної картини напруженого стану системи, проте дають уявлення про напруження у досліджуваних вузлах, і можуть використовуватись при компютерному моделюванні, для ідентифікації моделей.

Робота з аналізу і класифікації втомних руйнувань рам вантажних автомобілів також виконувалась [64, 70]. Всі руйнування елементів рам, що спостерігались вдалося розбити на порівняно невелику кількість характерних поломок. Викладені характеристики окремих груп пошкоджень деталей рами автомобілів ЗІЛ-164 складені на основі досліджень, виконаних в ЦНДІБК, ГОСНИТИ [71, 72] і, частково, в НДІАТ [64].

Найбільший інтерес для досліджень становлять поперечні тріщини поздовжніх лонжеронів, оскільки їх наслідки можуть бути катастрофічними. Встановлено, що найбільш імовірною є поява таких тріщин в місцях, де зосереджується дія одночасно поперечних сил та крутильних моментів. Це місця кріплення до рами підвіски, поперечин та інших агрегатів.

Іноді тріщини зароджуються біля контуру кронштейнів. Волога, яка затримується біля них викликає глибоку корозію стінок і є чинником концентрації напружень. Подібні концентратори напружень стають початком розвитку тріщин в місцях проведення ремонтних зварювальних робіт.

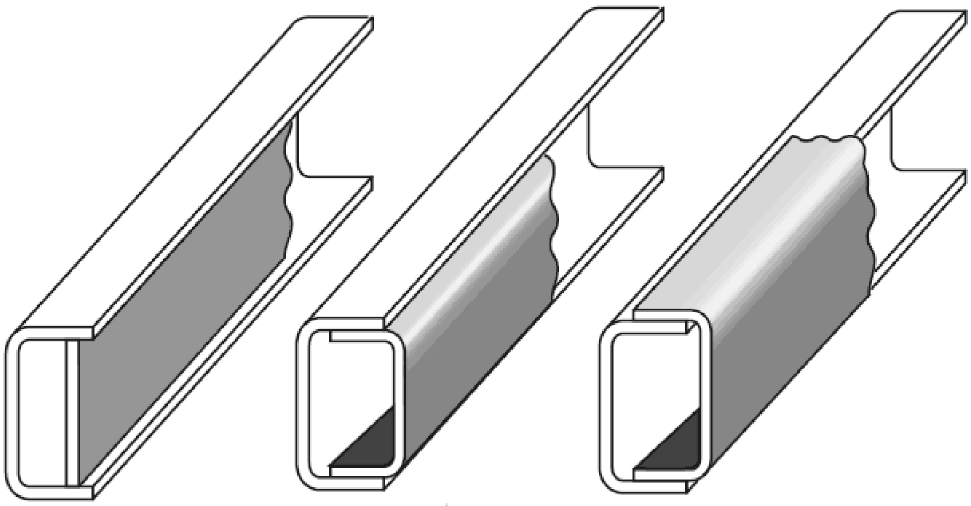
1.4 Аналіз методів ремонту та підсилення лонжеронів рамних конструкцій засобів транспорту

З аналізу літератури зрозуміло, що існує багато розробок, в яких запропоновано технологічні процеси ремонту рамних конструкцій з тріщинами [73-75]. Найбільш широко використовуються методи зварювання та встановлення підсилюючих накладок. Однак, досліджень зміни напружено-деформованого стану відновлених конструкцій дуже мало.

Дотепер, за умови наявності тріщини, що проходить за середину стінки повздовжньої балки, раму вітчизняного автомобіля бракують. Рама може бути відремонтована, якщо на одній поздовжній балці є не більше двох тріщин, що проходять до середини профілю. Рама, яка має на кожній повздовжній балці більше двох тріщин, що проходять до середини профілю, або одну й більше тріщин на одній з поздовжніх балок, що проходять за середину профілю, ремонту не підлягає й повинна бути замінена на нову. Це вимагає наявності запасів або виробництва нових рамних конструкцій до автомобілів, що експлуатуються.

Проте, велика кількість нових і давно знятих з виробництва автомобілів, успішно експлуатуються сучасними автотранспортними підприємствами, і, при виникненні вище розглянутих дефектів, підприємство втрачає автомобіль ресурс якого не вичерпано, в деяких випадках, і на 50%, що економічно недоцільно. Тому питання ремонту наскрізних поперечних тріщин рам досі залишається відкритим і є актуальним.

Підвищення пружних характеристик рами, при переобладнанні автомобіля або ремонті, можливе шляхом встановлення додаткових елементів (пластин, профілів) (рис. 1.7).



а) б) в)

Рисунок 1.7 – Схеми підсилення лонжерона швелерного типу: а) закритий швелерний профіль; б) вставлений один в інший швелерний профіль, в) вставлений один на інший швелерний профіль

Таке переобладнання значно збільшує масу автомобіля і не завжди є можливим. На практиці такі варіанти підсилення реалізуються шляхом встановлення дублюючого швелера меншого розміру в середині основного (рис. 1.8 а), частини швелера поверх основного (рис. 1.8 в) або просторових вставок (рис. 1.8 б).

а) б)

в)

Рисунок 1.8 – Варіанти конструктивних підсилень рами автомобіля КаМАЗ встановленням: а) дублюючого швелера меншого розміру в середині основного; б) просторових вставок; в) частини швелера поверх основного

Зварювання при виготовленні рам застосовується досить рідко, оскільки лонжеронні рами вантажних автомобілів відносно податливі на вигин, і, особливо, на кручення [76], а зварні шви в цих умовах є джерелом утворення тріщин.

Однак, рами більшості напівпричепів іноземного виробництва є суцільнозварними з лонжеронами двотаврового типу змінного перерізу. В процесі експлуатації на їх полицях виникають тріщини, ремонт яких, окрім їх заварювання, потребує додаткового підсилення певної частини рами (рис. 1.9).

а) б)

в) г)

Рисунок 1.9 – Етапи ремонту і підсилення рами напівпричепа:
а) забезпечення доступу; б) правка та закріплення в правильному положенні;
в) зачистка; г) заварювання тріщини та елемента підсилення

На даний час однозначної відпрацьованої методики розрахунку і виконання таких операцій не знайдено. А роботи по ремонту і підсиленню проводяться без відповідних проектних розрахунків, що не виключає можливість повторного руйнування.

Тому існує необхідність створення раціональних методик розрахунку режимів ремонтних операцій та проектування елементів підсилення, які б забезпечували отримання задовільних результатів щодо забезпечення надійності при мінімумі витрат праці, часу і матеріалів.

Загальним недоліком існуючих способів ремонтного зварювання рамних конструкцій транспортної техніки та технологічних машин є те, що вони не знаходять широкого застосування в практиці. Одні з них складні інші малоефективні.

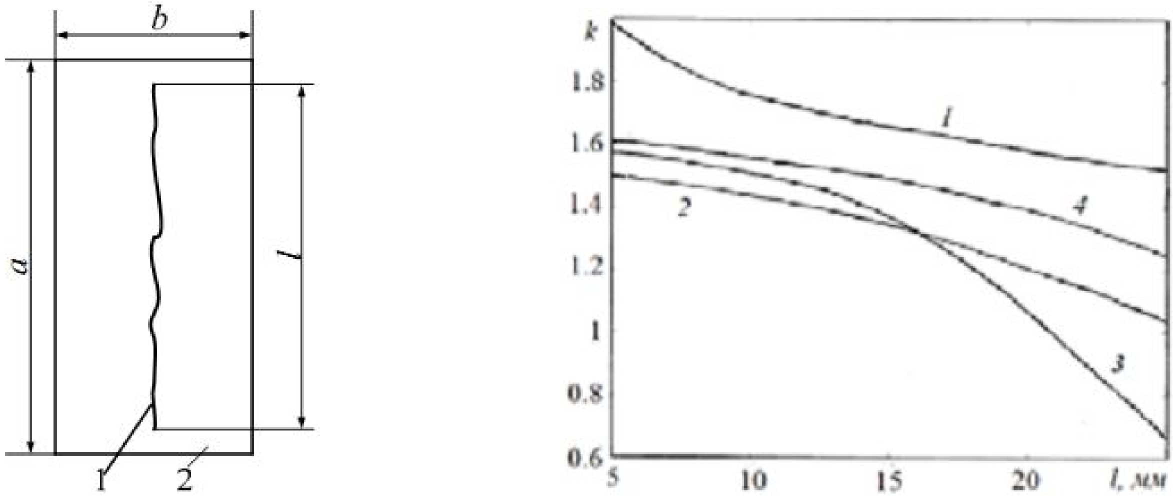
Наявність пошкоджень одного з елементів рами, найчастіше стінки лонжерона, різко знижує міцність і живучість усієї конструкції. Тому, далі розглянемо відомі можливості ремонту та посилення пошкодженої конструкції. Теоретичні підходи гальмування і зупинки тріщин пов'язані з використанням електричних, магнітних, термічних і термопружних полів, пружних імпульсів стиснення, двійникових прошарків, галуження тріщин, системи інших тріщин тощо [77]. Більшість цих підходів, будучи теоретично обґрунтованими, складні для застосування в реальних конструкціях. Для вирішення практичних завдань застосовуються, в основному, методи, засновані на зниженні коефіцієнта інтенсивності напружень [78]. В інженерній практиці основне значення надається використанню сталей з помірною величиною ударної в'язкості і застосуванню належним чином спроектованих пристосувань для зупинки тріщин [79]. Серед найбільш практичних розглядаються пристосування типу поглинач енергії (шар матеріалу з високою в'язкістю і тріщиностійкістю), ремонтні латки (накладки) і ребра жорсткості [80].

При ремонті рам здебільшого користуються ручним електродуговим зварюванням [81]. У зв'язку зі складністю конфігурації деталей і малою довжиною безперервних швів, автоматизувати зварювальні роботи при ремонті неможливо. Слід очікувати, що напівавтоматичне зварювання в середовищі вуглекислого газу може мати переваги перед ручним електродуговим зварюванням, однак його застосуванню повинно передувати дослідження по вибору режиму зварювання і зварювального дроту, придатного для ремонту деталей рами.

Слід зазначити, що навіть у добре виконаного стикового з'єднання витривалість нижча, ніж у основного металу за рахунок виникнення зони термічного впливу [82].

Тому, вибору форми і розмірів елементів підсилення приділяється відповідна увага [75, 83, 84]; однак, єдиної методики по вибору їх основних параметрів та техніки приварювання знайдено не було.

У роботі [83] виконана серія розрахунків з метою обґрунтування геометричних розмірів ремонтної накладки (рис. 1.10 а). Зменшення розмірів накладки може призвести до зниження гальмуючого тріщину ефекту, а збільшення призводить до збільшення довжини зварного шва, площі зони термічного впливу і підвищення крихкості розглянутої конструктивної зони, яка вже ослаблена зварним швом, яким заварена тріщина.



а) б)

Рисунок 1.10 – Вплив розмірів прямокутної ремонтної накладки на її ефективність: а) схема установки, б) залежність показника ефективності від довжини тріщини (1,2,3,4 – різні конструкції)

Для оцінки ефективності ремонтної латки, авторами введений розрахунковий показник $k = \sigma_{crack} / \sigma_{рз}$ – відношення напруження σ_{crack} в зоні тріщини до напруження $\sigma_{рз}$ в цій же зоні після установки ремонтної накладки. Очевидно, із зростанням цього показника ефективність латки зростає (рис. 1.10 б). Варіюванням співвідношення a/b (довжина і ширина латки), а також відношення *a/l* при різних довжинах тріщини було визначено рекомендовані розміри накладок. Однак, в дослідженні не розглядається різноманіття форм накладок (розглядається тільки прямокутна).

У роботі [75] місце із завареною наскрізною тріщиною пропонують підсилювати шляхом постановки накладок, що дублюються якщо цьому не перешкоджає конструкція вузла або деталі. В залежності від перерізу з'єднуваних елементів, накладки можуть бути плоскими, кутовими або коробчатими. В разі постановки односторонньої накладки її товщина повинна бути не менше 0,8–1,0 товщини основного металу деталі, двосторонньої – не менше половини. Автори вважають, що плоскі накладки повинні перекривати заварений стик або тріщину не менше ніж на 100 мм, при неможливості цього перекриття може бути зменшено до 50 мм. При приварюванні двосторонніх плоских накладок необхідно, щоб протилежні шви були зміщені не менше ніж на 30 мм. Загалом у роботі автори описують загальні рекомендації без наведення будь яких методик розрахунку, що, на нашу думку, є не припустимим при ремонті відповідальних конструкцій.

У [84] накладки рекомендується приварювати по всьому контуру, причому, в першу чергу, зварювати стикові шви ремонтованої конструкції, які розташовані перпендикулярно силовому потоку, потім інші стикові шви і, в останню чергу, кутові шви – спочатку поперечні, потім поздовжні.

Лобові і косі кутові шви рекомендується виконувати з відношенням більшого катета до меншого від 1,5 до 2. Великий катет повинен бути спрямований вздовж лінії дії зусилля, які сприймаються цими швами.

Підсилювальні накладки (рекомендується виготовляти) повинні бути виготовлені з сталей тих же марок, що і елементи основних деталей конструкції, або з інших сталей, наведених у кресленнях та інструктивних вказівках. Для посилення елементів конструкцій рекомендується також використовувати низьколеговані сталі марок 09Г2Д, 09Г2СД і 10Г2БД [83].

Проблемою посилення небезпечних зон шляхом встановлення елементів підсилення, а також відновлення таких зон з зародженими тріщинами, є небезпека пошкодження основного металу рами за рахунок негативних процесів, які можуть мати місце під час зварювання. До таких негативних процесів відносять потужні теплові поля від зварювальної дуги, напруження та деформації, що виникають при цьому, тощо. Потужні теплові поля можуть спричиняти у зоні термічного впливу перерозподіл хімічних елементів та рекристалізацію матеріалу рамної конструкції [82].

1.5 Методи підвищення міцності та корозійної стійкості ділянок рамних конструкцій засобів транспорту, що ремонтуються

Одним із прогресивних напрямків збільшення довговічності та експлуатаційних властивостей деталей машин є комбінування технологій ремонту. Такі технології описані в ряді робіт [85–89].

Питаннями взаємодії міді із сталлю займалися В. В. Чигарьов, Ю. Г. Бобро, П. А Гавриш та інші.

Так ІПМ НАНУ [85] представлено нову схему комбінування зварювання і паяння. Вона полягає в розміщенні паяльного матеріалу між деталями безпосередньо в зоні дії зварювальної дуги. Зварювання відбувається по кромках деталей з одночасним розплавленням припою. Авторами отримано авторське свідоцтво, проте подальшого розвитку цей напрямок не набув. Які паяльні матеріали використовувались при цьому також невідомо.

Використання сплавів міді в якості паяльного матеріалу обумовлене багатьма факторами. При виготовленні випарників, ежекторів, фурм доменних печей і конвертерів, кристалізаторів, хімічної апаратури, електровакуумних приладів і в багатьох інших випадках виникає необхідність з'єднання сталей різних класів з міддю та її сплавами - латунню, бронзою. З питань утворення нероз’ємних з’єднань сталей з міддю і її сплавами опубліковано досить велику кількість робіт [86–95]. Це пояснюється насамперед розмаїттям і труднощами завдань, які доводиться вирішувати в кожному конкретному випадку. Крім безпосереднього паяння, зварювання мідних деталей зі сталевими, з метою економії кольорових металів, доцільне наплавлення міді, бронзи або латуні на сталеві поверхні.

Достатньо висока рідкотекучість міді і здатність змочувати сталеві та інші поверхні дозволяє їй проникати вглиб найменших пошкоджень у металі та щільно заповнювати їх. Відома думка про негативний вплив такого процесу [86, 87] контактування сталі з рідкою міддю (мідними сплавами), що супроводжується міжкристалітним проникнення міді в сталь (МКП). Як результат – тріщини у вигляді «клинів», що мають місце на дефектній поверхні дотику відновлювальної деталі, глибина яких може сягати від 0,01 до 40 мм, заповнюються міддю. На думку авторів, це істотно знижує механічні властивості сталі ($\sigma_{0,2}$, $\sigma_{в}$, σ_{-1}, δ) і, особливо, пластичні. Механізм МКП пояснюється на основі уявлень про адсорбційне зниження міцності, міжзернову корозію і дифузію під напруженням, розклинювальну дію рідкої міді [88].

З іншого боку, фізико-хімічні властивості Cu та Fe близькі (будова кристалічної решітки, атомні радіуси і т. д.), що дає можливість отримання сполук міді (мідних сплавів) із залізом (сталлю) [90]. Ускладнюючим фактором є розбіжність у температурах плавлення, сильна різниця в теплопровідності і теплоємності, висока спорідненість міді до кисню, її висока рідкотекучесть, схильність до пористості, поява евтектики $Cu + Cu_2O$, що робить метал крихким.

З діаграми стану бінарної системи залізо-мідь слідує, що залізо з міддю сплавляється у всіх співвідношеннях. При цьому максимальна розчинність міді в α-залізі становить 6,5%, в β-залізі 8%, в γ -залізі 1,4% при 850 °С. Мідь розчиняє в собі залізо в таких кількостях: при температурі 1094 °С 4%; при 650 °С 0,2% [89].

Розглянемо характерні особливості взаємодії цих двох металів. При наплавленні міді на аустенітну сталь 12Х18Н9Т та їх зварюванні спостерігається проникання міді в сталь. Наявність феритної фази в сталі зменшує проникання в неї міді, а вміст фериту більше 30% в аустенітно-феритній сталі повністю усуває це проникнення. Попередній підігрів сталі І2Х18Н9Т до температури 800 °С викликає виділення феритної фази. Проникання міді при цьому знижується [97]. Була висунута наступна гіпотеза: тріщини при наплавленні міді на сталь утворюються в результаті спільної дії рідкої міді, що проникає в мікронадриви, які виникають при кристалізації матричної фази – сталі (ефект Ребіндера), і термічних напружень розтягу. Необхідною умовою виникнення цього ефекту є змочування стінок капіляра. З двох фаз, присутніх в розглянутих сталях, рідка мідь змочує аустеніт (γ-фазу) і не змочує ферит (α-фазу). Визначено, що розклинюючий тиск рідкої міді на сталь ~ 25 МПа. Проникання міді в сталь на глибину від декількох мікрометрів до декількох десятків міліметрів при наплавленні, зварюванні і паянні відзначено в роботах [94–96]. При цьому, допустима глибина проникнення, що не впливає на механічні властивості сталі, обмежується 0,3...0,5 мм. Вважають, що на проникання міді в сталь при наплавленні, зварюванні, пайці впливають такі фактори: час контактування розплавленої міді зі сталлю, із збільшенням якого збільшується глибина проникнення; напружений стан металу при наплавленні, зварюванні і пайці; структурний стан, хімічний склад сталі. У роботі [94] показано, що проникнення сплаву на основі міді в сталь 20, Ст 3сп і т. п. на глибину 0,8 мм практично не впливає на статичну і циклічну міцність біметалевих зразків. У той же час, при наплавленні олов'яної бронзи на сталь глибина проникнення 2-13 мм істотно знижує тимчасовий опір і опір втомі біметалу [95, 96]. Встановлено, що проникнення мідного сплаву в міцну сталь на глибину 1,2 мм практично не позначається на статичній і циклічної міцності при розтягу, статичному і ударному вигині біметалевих зразків, а також на міцності зчеплення наплавленого металу зі сталлю.

Можливість отримання якісного з'єднання міді і мідно-нікелевого сплаву з різними вуглецевими сталями показана в роботі [98]. Для зварювання тертям міді МЗР, М2, мідно-нікелевого сплаву Мн95–5 (95% Cu, 5% Ni) зі сталями 20, 45 і 60 використовували серійне обладнання (МСТ–31, МСТ–23, МСТ-200І). Один з основних параметрів, що визначають якість зварного з'єднання, – максимальна температура в стику. Металографічні дослідження показали, що утворення з'єднання відбувається за рахунок спільного перемішування поверхневих шарів міді і сталі.

Автори [96] проводили контактне зварювання сталі 10 з латунню Л63. Сталеві зразки (товщиною 1,2 ... 1,6 мм) перед зварюванням знежирювали, а латунні (товщиною 1,2–1,6 мм) механічно зачищали. При зварюванні міді та її сплавів потрібні певні технологічні прийоми, що забезпечують високу концентрацію теплоти в місці контакту деталей [95]. Один з цих прийомів – установка теплового екрана, наприклад молібденової пластини товщиною 0,6 мм, між латунним листом і мідним електродом для створення необхідної концентрації теплоти в місці контакту деталей, при цьому, зростання зерен прискорюється приблизно на 20%. Зразки, виконані точковим зварюванням за допомогою молібденового екрану, при випробуванні на розрив у всіх випадках руйнувалися, що супроводжувалося вириванням зварних точок з латунної чи сталевої пластини, що свідчить про задовільну якість зварного з'єднання.

Вивчено будову і властивості біметалу сталь 16ГС + мідь М1Б, отриманого зварюванням вибухом [99]; товщина плакуючого шару становила 4-10 мм. Для призначення оптимальних режимів подальшої (після зварювання) гарячої прокатки для листів заданих розмірів необхідно знати закономірності зміни будови і фізико-механічних властивостей при нагріванні біметалевих заготовок у процесі зварювання вибухом. Зразки для випробувань вирізали з різних ділянок по довжині і ширині двошарової заготовки. При вивченні будови біметалу при температурі 20 °С встановлено наявність щільного з'єднання шарів біметалу (лише в 3% зразків були виявлені пори і мікротріщини в зоні зварювання). Межа міцності при зрізі становила 153 ... 310 МПа, при розриві 234 ... 342 МПа; більше 80% зразків витримали випробування на вигин, пластичні властивості біметалу після зварювання низькі (δ = 8,0 ... 17,5%). Металографічне дослідження зразків виявило типову для зварювання вибухом картину на контактуючих поверхнях: хвилеподібна межа розділу шарів з окремими ділянками, де рух металу в момент зварювання мав турбулентний характер [100]. Мікрорентгеноспектральний аналіз виявив, що в зонах перемішування, розташованих в западинах хвиль, міститься 40-50% Cu і 45 ... 55% Fe, а в зонах, розташованих на гребенях хвиль – 55 ... 65% Ci і 30 ... 40% Fe. Оскільки, взаємна розчинність міді та заліза у твердому стані в рівноважних умовах невелика, утворення фази, яка містить такі значні кількості заліза і міді, можливе лише при розплавленні дотичних ділянок під час вибуху і подальшого їх загартування за рахунок високої швидкості тепловідведення [101]. Відпал на протязі години при температурі 700 або 900°С призводить до зростання відносного подовження до 25% при відповідному зниженні тимчасового опору до 380 ... 420 МПа. При цьому, зменшуються відмінності у властивостях зразків, вирізаних з різних зон двошарової заготовки. Зміна властивостей біметалу після відпалу пов'язана з розвитком рекристалізації як в основному, так і в плакувальному шарах. У сталі і міді знайдені ділянки рекристалізованих зерен, пластично деформовані зони та ділянки з рівноважною структурою.

Одним з найбільш перспективних способів з'єднання різнорідних металів тиском є дифузійне зварювання у вакуумі, яке забезпечує отримання вакуумно-щільних, термостійких, віброміцних зварних з'єднань при збереженні високої точності геометричних розмірів і форм виробів. [102]. Мікроструктурний аналіз сполук, зварених за розробленими оптимальними режимами, показав відсутність непровару, мікротріщин та інших внутрішніх дефектів.

У [103] проводили дослідження процесів зварювання сталі з сплавами на мідній основі. В результаті авторами виявлено в зварному шві наявність прошарків кристалізаційного і дифузійного характеру. Встановлено, що при переході в зварний шов значної кількості заліза утворюються, так звані, дендритні кристалізаційні прошарки, що спричиняє підвищення міцності границі сплавлення, але зменшує пластичність зварного зєднання. Застосовуючи вдосконалені зварювальні матеріали [104, 105] і технологію зварювання з урахуванням розрахунку термодинамічних параметрів і технології зварювання [106], авторами отримані дані про можливість зниження зони кристалізаційного прошарку і про зменшення кількості дендритних включень, що дає можливість прогнозувати механічні властивості зварних з’єднань.

Важливим завданням залишається виявлення, захист, знешкодження, та ізоляція корозійно вразливих ділянок, задля зменшення ймовірності виникнення тріщин на початкових етапах їх зародження.

1.6 Висновки та постановка задач дослідження

1. Аналіз наукових робіт та практики експлуатації рамних конструкцій на транспорті та в інших галузях показав, що утворені тріщини локалізуються на характерних ділянках. Положення цих ділянок визначається конструктивними особливостями рами, характером експлуатаційних навантажень. Ймовірність появи ушкоджень на цих ділянках корелює з конфігурацією полів напружень та деформацій, які можуть бути розраховані з використанням методів кінцевоелементного аналізу.

2. Більшість методик моделювання та розрахунків тріщиностійкості матеріалу рам засобів транспорту не дають можливості враховувати додаткові навантаження (наприклад від встановленого додаткового обладнання), є досить складними і не адаптованими до використання в умовах ремонтного виробництва.

3. Поширені технології ремонту тріщин рам методами зварювання, ґрунтуються на рекомендаціях практиків-ремонтників без врахування конкретних схем навантажень, умов експлуатації та особливостей конструкції. Науково обґрунтовані методи проектування таких технологій відсутні.

4. В технічній літературі рекомендовано ряд варіантів підсилення нових та рам, що підлягають ремонту, проте не знайдено конкретних методик, щодо обґрунтування форм та розмірів елементів підсилення.

5. Розглянуті технології та техніки приварювання елементів підсилення основані на загальних положеннях теорії зварювання, що, на нашу думку, є неприпустимим при ремонті відповідальних конструкцій і потребують відповідних уточнень щодо послідовності, визначення режимів та техніки виконання зварних швів в процесі ремонту тощо.

Метою роботи є збільшення терміну експлуатації рамних конструкцій засобів транспорту шляхом удосконалення технологічних процесів ремонту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- розробка методики локалізації розташування та розмірів ділянок рам транспортних засобів з високою ймовірністю виникнення тріщин;

- наукове обгрунтування методики визначення параметрів накладок для ремонту та відновлення рам;

- розробка та обгрунтування технології ремонту дефектів лонжеронів рам методами зварювання;

- дослідження процесів формування полів температур, напружень та деформацій у матеріалі рам від процесів зварювання та їх впливу на експлуатаційні властивості металу;

- дослідження можливості підвищення якості ремонту рам шляхом поєднання процесів зварювання та високотемпературного паяння;

- розробка практичних рекомендацій щодо складу та раціональних параметрів операцій ремонту рамних конструкцій засобів транспорту.

РОЗДІЛ 2
МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.2 Матеріали для ремонту та підсилення рамних конструкцій транспортних засобів

2.1.1 Матеріали рам засобів транспорту

У роботі досліджувались широко застосовувані у автомобілебудуванні сталі, що відносяться до першої групи зварюваності [5, 107] (сталь 09Г2, 09Г2С, 10Г2БД, Ст3сп). Вище вказані низьколеговані кремнієво-марганцеві сталі характеризуються підвищеною міцністю в порівнянні з низьковуглецевою сталлю. Для низьколегованих кремнієво-марганцевих сталей межа текучості дорівнює $\sigma_{0,2}$ = 320...350 МПа, а межа міцності $\sigma_в$ = 500...550 МПа. Відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_в$ = 0,65...0,75, що забезпечує надійність роботи рамних конструкцій вантажної техніки.

Низьколеговані кремнієво-марганцеві сталі в гарячекатаному і нормалізованому станах мають ферито-перлітну структуру.

При збільшенні вмісту марганцю в сталі з 0,07% до 1,83% відбувається зниження порогу холодноламкості у низьковуглецевої сталі. При вмісті в сталі Mn>1,83% поріг холодноламкості зміщується в бік більш високої температури.

Кремній значно збільшує міцність низьковуглецевої сталі, однак при вмісті його вище 2% знижується пластичність, ударна в'язкість і погіршується холодноломкість. Крім того, кремній різко знижує ударну в'язкість зварних з'єднань через схильність до утворення гарячих тріщин.

Застосування цих сталей замість звичайних низьковуглецевих (Ст3сп, 20, 20К та ін.) дозволяє знизити витрати металу в середньому на 20%, знизити витрати при виготовленні обладнання та його транспортування на 15 ... 25%, що сумарно дає економічний ефект.

2.1.2 Матеріали для зварювання і супутніх процесів

Для заварювання тріщин рамних конструкцій використовувались електродні матеріали загального призначення для зварювання вуглецевих і низьколегованих конструкційних сталей УОНІ 13/55 ГОСТ 9467–75 ГОСТ 15150–69.

Характеристики використаних марок електродів, наведений у таблиці 2.1 [108].

Таблиця 2.1 – Характеристики досліджуваних матеріалів

Тип електрода	Марка електрода	Зварюваність сталі	Рід струму	Просторове положення	Режим зварювання	
					Діаметр	Струм зварювання
Е50А	УОНІ-13/55	Вуглецеві і низьколеговані сталі з $\sigma в$ до 450 МПа при підвищених вимогах до металу шва по пластичності, ударній в'язкості і стійкості проти утворення тріщин	Постійний, зворотної полярності	Всі положення (електроди діаметром 5,0 мм - тільки для нижнього і вертикального)	2,0 2,5 3,0 4,0 5,0	35-60 40-75 70-100 130-160 160-210
Е42А	УОНІ13/45	Вуглецеві і низьколеговані сталі з $\sigma_в$ до 410 МПа при підвищених вимогах до металу шва по пластичності, ударній в'язкості і стійкості проти утворення тріщин	Постійний, зворотної полярності	Всі положення (електроди діаметром 5,0 мм - тільки для нижнього і вертикального)	2,0 2,5 3,0 4,0 5,0	35-60 40-75 70-100 130-150 160-200
Е50А	ОЗС-33	Те ж	Змінний, постійний будь якої полярності	Те ж	3,0 4,0 5,0	90-140 130-210 160-270
	ОЗС-25	Те ж, в тому числі при знижених температурах	Постійний, зворотній полярності	Всі положення (електроди діаметром 5,0 мм - тільки для нижнього і вертикального)	2,5 3,0 4,0 5,0	40-75 70-100 130-160 160-200

Для ремонтного заварювання-паяння рамних конструкцій з тріщинами використовували припої на основі міді. Це найбільш розповсюджені припої для високотемпературного паяння. До цієї групи відносяться мідь і її сплави Cu - Zn, Cu -Ni, Cu-P і Cu-Mn- Ni [108, 109].

Мідь має низьку пружність пари у вакуумі і тому широко використовується для високотемпературного паяння у вакуумі вуглецевих і легованих сталей [110]. Однак, при паянні в окислювальних середовищах утворюються газові пори і кристалізаційні тріщини через утворення евтектики Cu - CuS. Мідно-цинкові припої використовують для паяння міді, сталей і чавунів при швидкому нагріванні на повітрі газовим пальником, СВЧ, в соляних ваннах. Вони мають більш низьку температуру плавлення, (825 ... 905°C), високу корозійну стійкість, міцність і пластичність.

Випускаються ПМЦ-36, ПМЦ-48, ПМЦ-54, Л-62, ЛОК-62-06-04 та ін. Паяння здійснюють з використанням флюсів на основі бури і борної кислоти. Паяння у вакуумі і газових середовищах не здійснюють через випаровування цинку [111].

2.1.3 Зразки для експериментальних досліджень

Для експериментальних досліджень використовували елементи відпрацьованих рамних конструкцій (рис. 2.1).

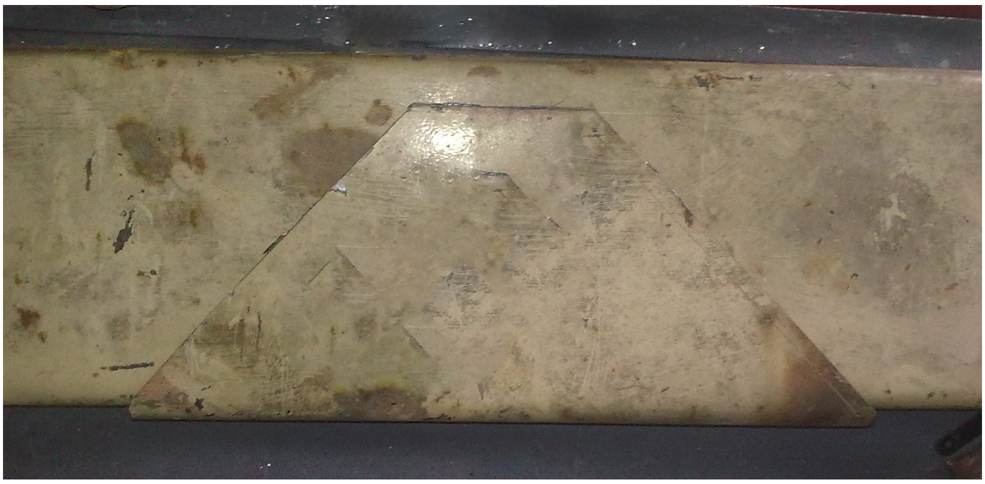


Рисунок 2.1 – Лонжерон рами з накладкою для підсилення

Для проведення експериментальних досліджень з метою визначення впливу режимів та параметрів операцій технологічного процесу приварювання підсилюючих накладок на структуру та механічні властивості матеріалу основи виготовлялись дослідні зразки (рис. 2.2).

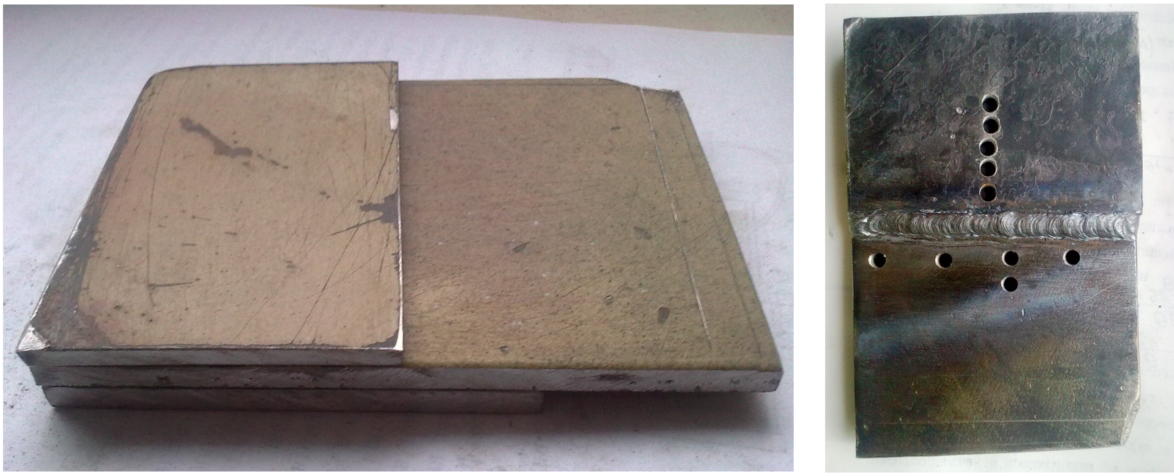


Рисунок 2.2 – Дослідні зразки

Для визначення напрацювання до виникнення мікротріщин з заварених експериментальних зразків, вирізались темплети для проведення ударно-циклічних випробувань на втомну міцність (рис. 2.3) [112].

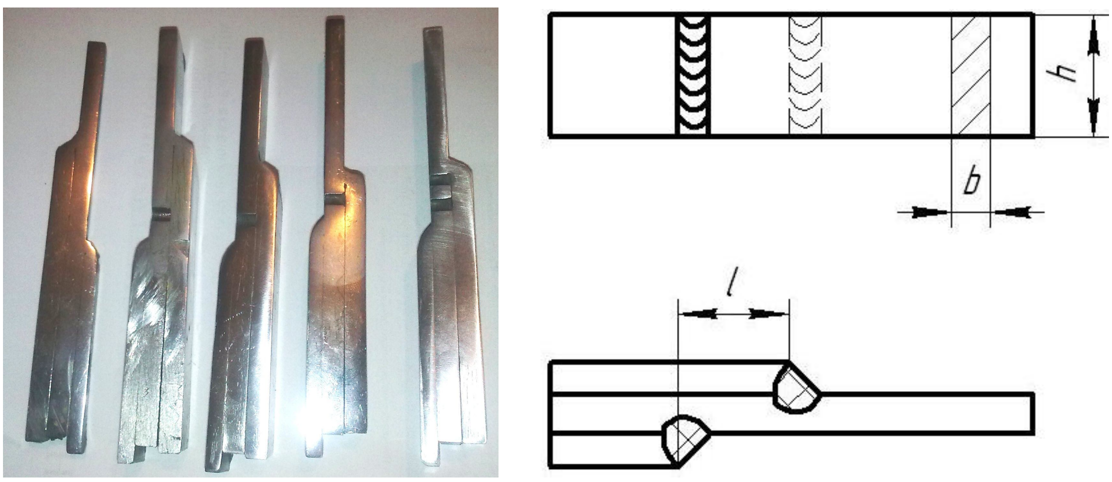
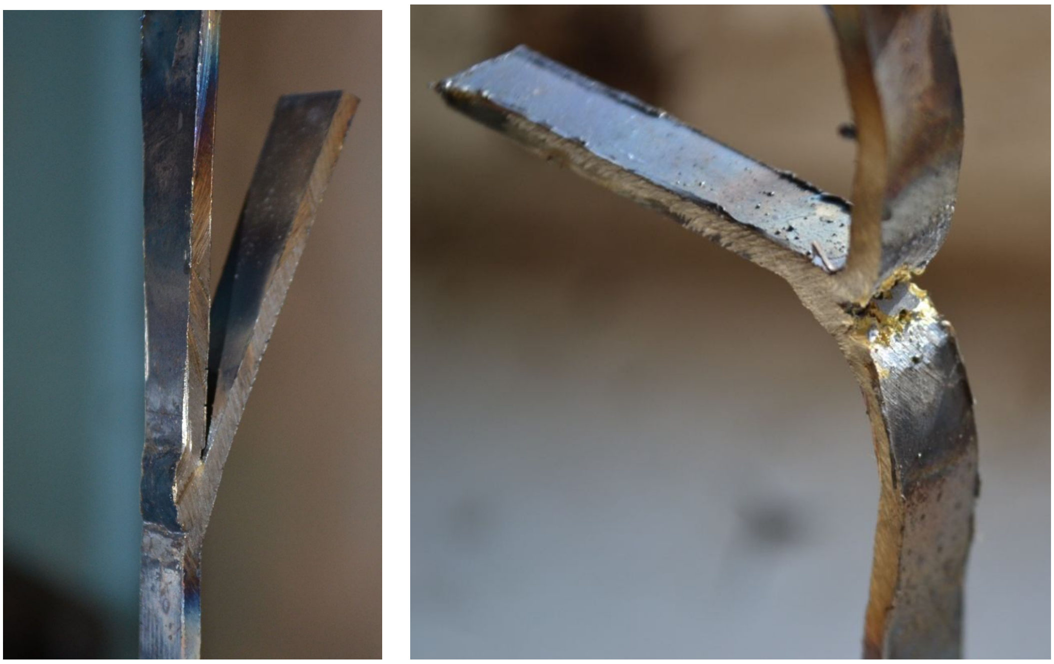


Рисунок 2.3 – Дослідні зразки для визначення втомного напрацювання

Для визначення запасу міцності заварених зразків, проводились випробування на розрив (рис. 2.4) та ударну в’язкість (рис. 2.5). Оскільки, чітких стандартів, щодо проведення випробувань зварних з’єднань в напуск знайдено не було, вирішено використати відомі методики випробувань, що подібні з умовами роботи конструкції, описані в [113, 114].



а)   б)

Рисунок 2.4 – Зразки для випробувань на: а) зсув, б) позацентровий розтяг

Рисунок 2.5 – Дослідні зразки для визначення ударної в’язкості

Ремонт рам транспортної техніки за запропонованою технологією проводили на підприємствах ДП «45 ЕМЗ» та МПП «РБД–7» (Додаток А).

Експлуатаційні випробування на автомобілях протягом 4-х років з пробігами більше 300 тис. км повторного руйнування не виявили.

2.2 Методика діагностування та дефектування рамних конструкцій транспортних засобів

Дослідження характеру та величини тріщин, що утворились в процесі експлуатації проводили на елементах рамних конструкцій вантажних автомобілів, які надійшли в капітальний ремонт. Вимірюванню підлягали очищені, ретельно промиті та просушені поверхні рам. Додаткова увага була приділена зварним з’єднанням та місцям кріплення силових вузлів та агрегатів.

Для виявлення прихованих дефектів у рамах застосовували метод магнітної дефектоскопії [115]. Для виявлення дефектів цим методом, деталь спочатку намагнічували, потім посипали сухим магнітним порошком і заливали суспензією, що складається з суміші гасу і трансформаторного масла (1:1). При наявності на деталі тріщини магнітний порошок буде притягатися її краями і межі тріщини вимальовуються.

2.4.1 Визначення якості зварних з’єднань

Зовнішній огляд. Зовнішнім оглядом (ВІК) перевіряли якість підготовки і складання заготовок для зварювання, якість виконання швів у процесі зварювання і якість зварних з'єднань. Виконані зварні з'єднання піддавали візуальному вимірювальному контролю з метою виявлення деформацій, поверхневих тріщин, підрізів, пропалів, напливів, кратерів, свищів, пор, раковин та інших дефектів форми швів. Геометричні параметри швів вимірюють за допомогою шаблонів або вимірювальних інструментів.

Контроль здійснюється за ДСТУ ISO 17637: 2003. При візуальному контролі визначали також ділянки деталей, які викликають підозру щодо наявності дефекту. Сумнівні ділянки позначались (обводились) крейдою і потім контролювались неруйнівними методами.

Ультразвукова дефектоскопія. Ультразвуковий контроль, як один із методів неруйнівного контролю зварних з’єднань, здійснювався за ГОСТ 14782–86, та рекомендаціями роботи [116].

Основний спосіб контролю – ехометод з використанням суміщеного нахиленого перетворювача поперечних хвиль. При цьому, використовували ультразвуковий дефектоскоп УД2–12. Згідно рекомендацій були обрані такі параметри проведення ультразвукової дефектоскопії: частота хвиль – 4 МГц; розмір п’єзопластини – 5мм; кут введення 60^{o}; рівень фіксації – $1мм^2$.

Вимірювання твердості зварних швів та зон їх термічного впливу. Вимірювання твердості, як одного із показників якості, проводилось за методом Роквелла. При цьому, в залежності від умов, використовувались: твердомір динамічний малогабаритний ТДМ–1; твердомір ТК–2М, ПМТ–3.

Визначення структури зварних швів та зон термічного впливу. Дослідження мікроструктури зварних з’єднань та зони термічного впливу проводили на мікрошліфах.

При виготовленні зразків намагалися уникнути процесів нагрівання та наклепування. Для виготовлення мікрошліфів використовували електроерозійні верстати.

Приготування мікрошліфа здійснювали за ГОСТ 11545–65. Зразок, розміщений в металевій оправці, заливали епоксидною смолою або сплавом Вуда. Процес підготовки мікрошліфа складався з декількох етапів: підготовка плоскої поверхні, шліфування, полірування. Мікрошліфи для проявлення мікроструктури підлягали хімічному травленню 4% розчином азотної кислоти в етиловому спирті на протязі 5 ... 30с, в залежності від структури нанесеного покриття. Потім промивали водою, протирали поверхню спиртом і просушували. Зразки підготовлених мікрошліфів показано на рис. 2.6.

Мікроструктурний аналіз проводився паралельно з використанням оптичної та електронної мікроскопії. Це дало змогу більш детально та повно проаналізувати мікроструктуру покриття.

Оптична мікроскопія проводилась на мікроскопі МИМ–8М з подальшою фіксацією зображень за допомогою цифрової фотокамери. Електронна мікроскопія проводилась на мікроскопі РЕМ–106И (рис. 2.7).

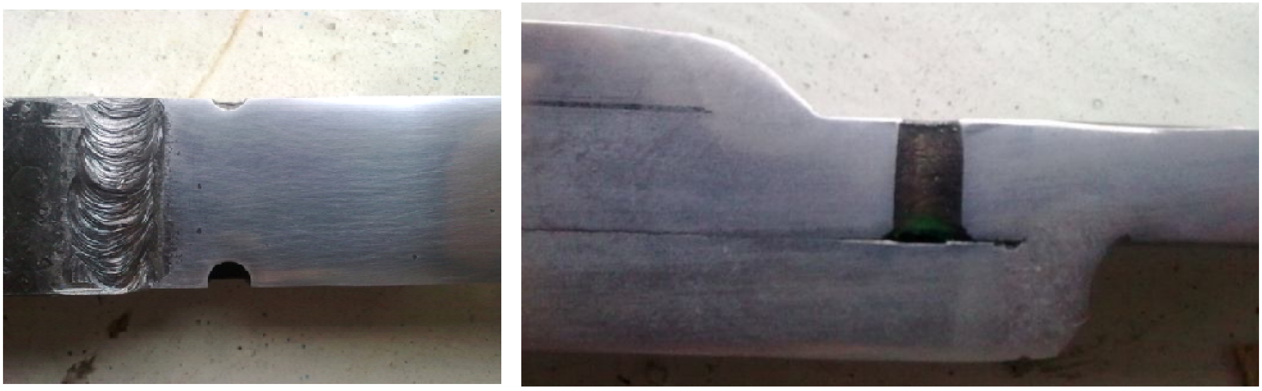


Рисунок 2.6 – Зразки для мікрошліфів:

Мікроскоп призначений для вимірювання лінійних розмірів елементів топології та параметрів мікрорельєфу поверхні різноманітних об’єктів в твердій фазі та вимірювання масової частини елементів у складі об’єктів методом рентгенівського мікроаналізу, для дослідження поверхні непровідних об’єктів без спеціальної підготовки в режимі низького вакууму.

Технічні характеристики:

Роздільна здатність мікроскопу у вторинних електронах в режимі високого вакууму не більше 4 нм.

Діапазон зміни збільшення від 15… 300000 крат.

Універсальний механізм переміщення об’єктів забезпечує:

- установку зразка максимальним діаметром 50 мм,
- переміщення зразка по координатам X, Y на ± 25мм з кроком 0,5 мкм,
- точність позиціювання по координатам X, Y 1 мкм,
- переміщення по координаті Z на 60 мм,
- обертання зразка на 360˚,
- нахил платформи від 0 до -20˚ та від 0 до 60˚,

Діапазон вимірювання лінійних розмірів від 0,2 мкм до 5000 мкм.

Похибка вимірювання 4%.

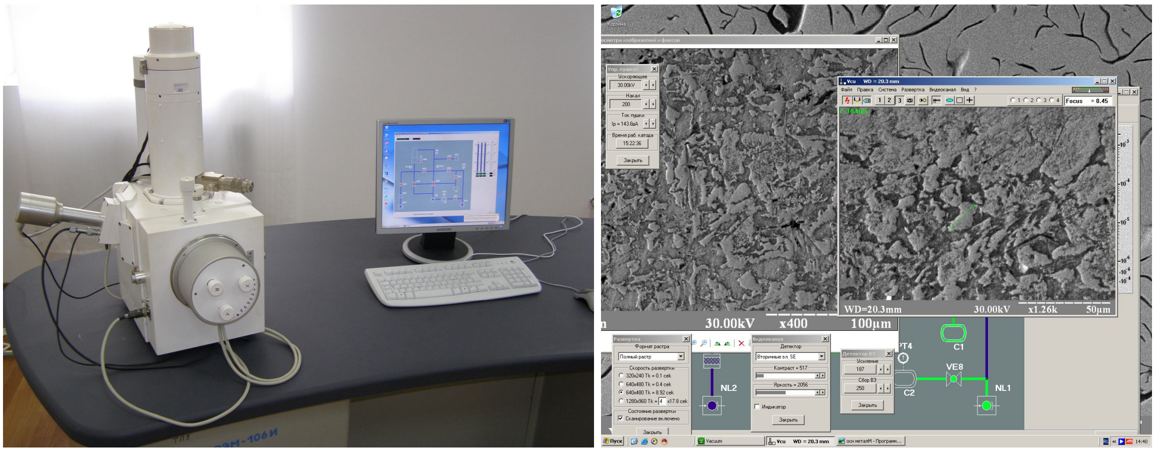


Рисунок 2.7 – Електронний мікроскоп РЕМ–106И

Формування зображення здійснювалось за допомогою вторинних електронів із прискорюючою напругою 18 ... 20 кВ. Фотографії мікроструктур, після відповідної комп'ютерної обробки результатів сканування електронним зондом, зберігались у вигляді зображень безпосередньо у пам’ять ПК.

Вимірювання мікротвердості структурних складових. Мікротвердість структурних складових зварного з’єднання по глибині вимірювали на металографічних шліфах за допомогою мікротвердоміру ПМТ–3 відповідно до ГОСТ 9450–76. Мікрошліфи виготовлялися за технологією, що описана вище. Навантаження на інденторі становило 0,5 та 1 Н в залежності від складових структури, що вимірювались. Як індентор використовувалась алмазна піраміда із кутом сходження граней 45º. Подальше кількісне визначення величини мікротвердості проводилось шляхом вимірювання діагоналі відбитку на електронному мікроскопі РЕМ–106И, що дало змогу уникнути похибок визначення довжини при оптичному методі вимірювання, та перерахунку отриманих значень за ГОСТ 9450–76.

Оцінка тріщиностійкості зразків з лонжеронів, підсилених накладками.

Для оцінки довговічності відремонтованих конструкцій проводились випробування ударно–втомної міцності темп летів, вирізаних із зразків, заварених на різних режимах [112]. Для цього підготовлено експериментальну установку рис. 2.8, випробування на якій фіксувались відеокамерою. Крім того, через певну кількість циклів проводились оптичні дослідження робочих поверхонь на предмет зародження та характеру розповсюдження втомних тріщин.

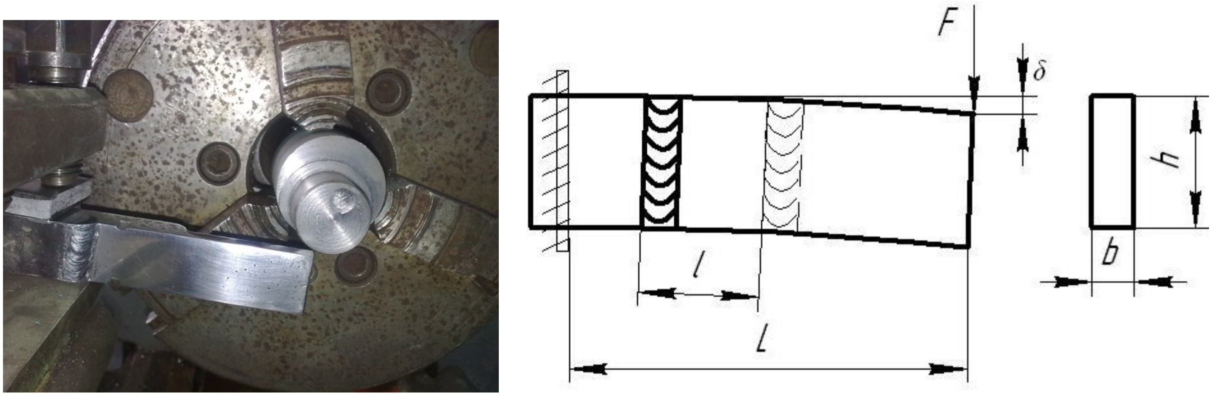


Рисунок 2.8 – Установка для випробування ударно–втомної міцності

В процесі випробувань також фіксували кількість циклів, область зародження та довжини підростання тріщин.

2.4.2 Методика вимірювання температури деталі

Температурні поля під час проведення процесу зварювання визначали за схемою, що показана на рисунку 2.9. Для цього шляхом засвердлювання у характерних точках дослідних зразків встановлювали термопари. Сигнал від термопар поступав до аналогово-цифрового перетворювача і виводився на дисплей. Отримані дані фіксувались відеокамерою, а потім оброблялись з допомогою ПК.

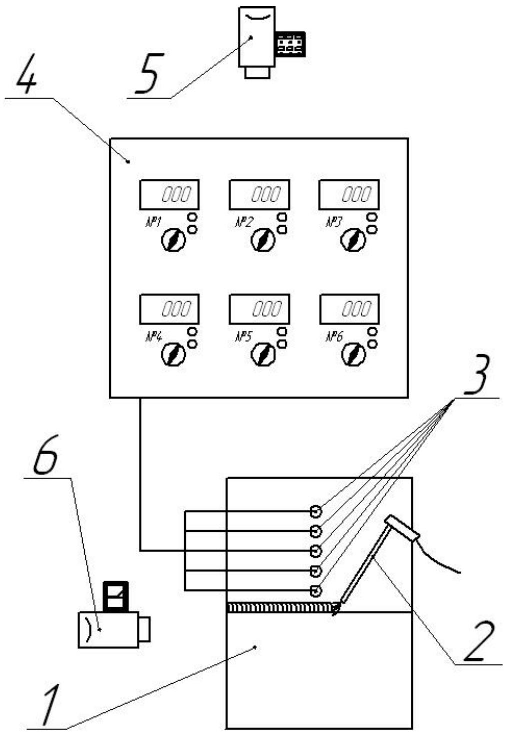


Рисунок 2.9 – Вимірювання температури деталі під час зварювання

1 – деталь з накладкою, 2 – зварювальний електрод; 3 – термопари, 4 – прилад для вимірювання температури, 5 – відеокамера, що фіксує зміну температури, 6 – відеокамера, що фіксує зміну положення зварювального електрода

2.4.3 Методика визначення напружень в рамних конструкціях

Для визначення дійсної навантаженості елементів рам в реальних умовах експлуатації використано метод тензометрування, результатом якого є осцилограми напружень (рис. 2.10). Обробка реалізацій процесів навантаження проводилась в такій послідовності: визначення масштабу запису, розмітка осцилограм, визначення екстремальних значень з урахуванням дійсного розташування нульового рівня. Масштаб запису визначався за формулою

$$A = \frac{E \cdot \varepsilon_T}{h_T} \tag{2.1}$$

де $E = 2 \cdot 10^5$ – модуль пружності, МПа;

ε_T - деформація, що відповідає електротарирувальному сигналу (береться з паспорта підсилювача);

h_T - відхилення сигналу на осцилограмі від нульової лінії, в мм.

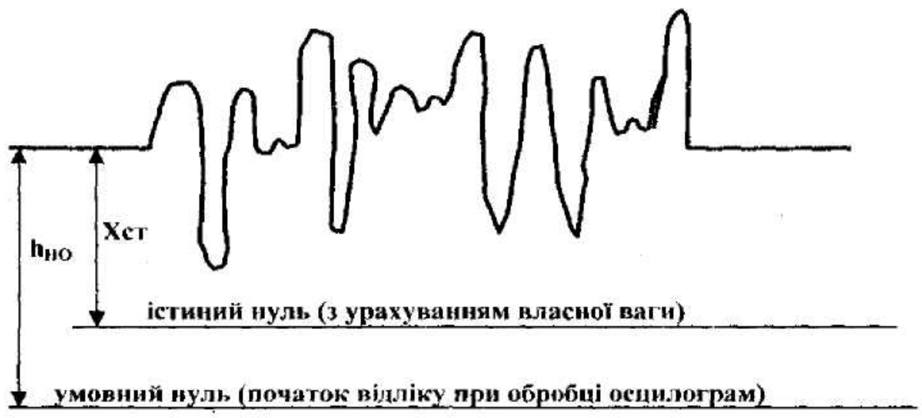


Рисунок 2.10 – Осцилограма запису напружень

При розшифровуванні осцилограм наносяться лінії умовного нуля, виділяються екстремальні точки, які враховуються при обробці, визначаються X_{max} та X_{min} значення амплітуд процесу. Потім максимум та мінімум корегуються в залежності від дійсного розташування нульового рівня навантаженості з урахуванням тарирувального коефіцієнта А.

$$\sigma_{\max}^{H} = (X_{\max}^{H} - X_{cm}^{'}) \cdot A \text{, МПа} \tag{2.2}$$

$$\sigma_{\min}^{H} = (X_{\min}^{H} - X_{cm}^{'}) \cdot A \text{, МПа} \tag{2.3}$$

де $\sigma_{\max}^{H}$ - найбільше максимальне значення напружень в матеріалі рами;

$\sigma_{\min}^{H}$ - найменше мінімальне значення напружень в матеріалі рами;

$X_{cm}^{'}$ - положення нульової лінії на осцилограмі з урахуванням статики, яке визначається згідно рис. 2.10:

$$X_{cm}^{'} = h_{н.о.} - X_{cm} \tag{2.4}$$

На основі результатів розшифровування осцилограм можливо робити висновки про динаміку та статичну міцність конструкцій. За найбільшим максимальним напруженням визначається коефіцієнт запасу статичної міцності

$$n_{cm} = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\max}^H} \quad . \tag{2.5}$$

Для експериментального дослідження динамічних процесів в матеріалі рамних конструкцій використовували тензорезистори на паперовій основі 2ПКБ-20-200 з базою 20мм та номінальним опором 200 Ом. При менших значеннях опору в більшій мірі виявляється вплив перехідних опорів різних контактів, що входять в вимірювальні кола, а також вплив опорів вимірювальних дротів.

При тензометричних дослідженнях використовують підсилювач і осцилограф. Навантаження балки проводиться вантажами від нуля до 100Н. За отриманими даними будувався тарувальний графік. Після дослідження діючих на раму транспортного засобу сил в експлуатаційних умовах випливає, що перерізи швелерів (які найчастіше використовуються в рамних конструкціях) зазнають напруження від згинання в вертикальній та горизонтальній площинах, від чистого кручення, стискання (розтягування), а також стисненого кручення. Сумарне нормальне напруження можна визначати за формулою:

$$\sigma_{сум} = \frac{M_x y}{I_x} - \frac{M_y x}{I_y} + \frac{N}{F} + \frac{B_\omega}{I_\omega} \tag{2.6}$$

Для вимірювання нормальних напружень в швелерах рами тензодатчики наклеювали не тільки по краях поличок, а і по краях стінок. Вид епюри нормальних напружень в перерізі змінюється в залежності від напруженого стану (рис. 2.11).

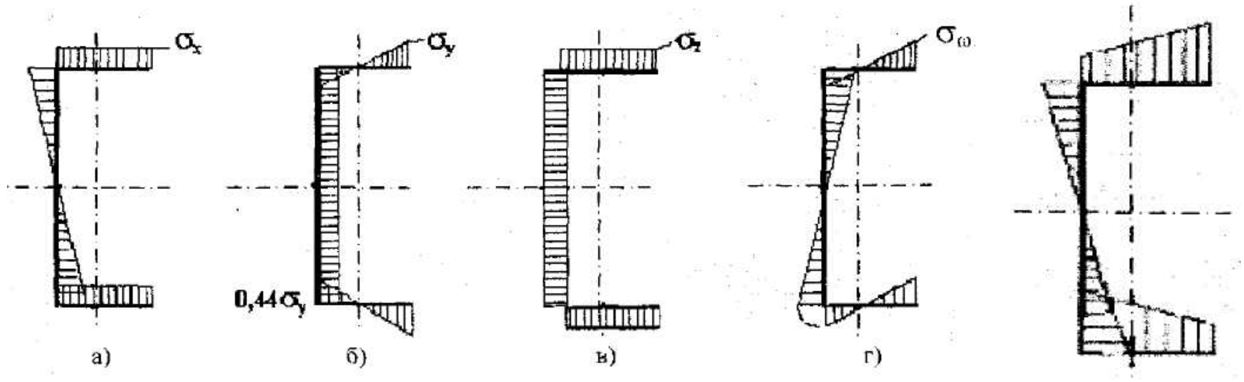


Рисунок 2.11 - Розподілення нормальних напружень в перерізі швелера:

а) від згину в вертикальній площині $\sigma_x = \dfrac{M_x}{I_x} y$

б) від згину в горизонтальній площині $\sigma_y = \dfrac{M_y}{I_y} x$

в) від поздовжніх сил $\sigma_z = \dfrac{N}{F}$

г) від стисненого кручення $\sigma_\omega = \dfrac{B_\omega}{I_\omega}$

д) сумарна епюра нормальних напружень (швелер)

Сумарна епюра нормальних напружень лінійна на окремих ділянках профілю. Найбільші нормальні напруження виникають в кутових точках перерізу. Отже, датчики доцільно розташовувати в чотирьох кутових точках перерізу.

Аналіз напружено-деформованого стану рами, виконаний аналітичними методами, дозволяє обґрунтовано розташовувати вимірювальні точки та мінімізувати їх кількість. Щоб виключити вплив крайових ефектів та концентрації напружень на показники датчиків, вони наклеювались на відстані 10 ... 15 мм від місць, які могли б бути концентраторами та від краю конструкції.

Навантаженість несучої системи напівпричепа визначалась методом вимірювань по вхідних впливах та вихідних змінних. Вхідними впливами є мікропрофіль доріг, вага вантажу, що перевозиться, вплив трактора на причіп. Вихідними параметрами є напруження в елементах несучої конструкції. Вибір режимів стендових випробувань несучої системи напівпричепа проводився на основі аналізу результатів статистичної обробки експлуатаційних досліджень напружень в елементах рами. Отже, отримана при експлуатаційних випробуваннях інформація є підставою для формування режимів стендових випробувань конструкції на міцність та надійність.

2.3 Алгоритм моделювання та досліджень рамних конструкцій у середовищі програм кінцево-елементного аналізу

В загальному, комп’ютерне моделювання окремих операцій, що супроводжуються виділенням тепла (зварювання, паяння, тощо) здійснюється в такій послідовності:

будуємо 3-D модель деталі;

задаємо, у відповідності до робочого креслення, певні фізико-механічні властивості матеріалу;

зазначаємо ступені вільності та розташування деталі в просторі;

генеруємо кінцево-елементний аналог деталі;

задаємо навантаження, що діють на деталь під час проведення операції, та час їх дії, тощо;

проводимо розрахунок результуючих величин (температура, деформації, напруження, тощо) із наступним виводом отриманих даних у вигляді графіків, таблиць, полів та т.і.

Створена модель записується у пам’яті комп’ютера у вигляді файлу.

Розглянемо більш детально моделювання такої операції технологічного процесу як приварювання накладок по обидві сторони лонжерона рами вантажного автомобіля.

Для спрощення процесу моделювання та зменшення часу розрахунку з метою визначення температурних полів, оптимальних схем та режимів проведення зварювання, що спричиняють найменші втрати запасу міцності основного металу від впливу температурних полів, а, отже, підвищують міцність усієї конструкції, використовуємо деталь-представник, що складається із основи та двох пластин. Першим етапом є створення 3-D моделі деталі. Для її побудови можна використати як модуль самих програм кінцево-елементного аналізу, так і імпортувати попередньо створену модель із переважної більшості CAD-систем, зокрема КОМПАС-3D, AUTOCAD або SolidWorks. Для цього модель необхідно зберегти у одному із форматів, що розпізнає програма кінцево-елементного аналізу, наприклад igs, sat чи x_t. Імпортованій моделі автоматично присвоюються стандартні фізико-хімічні властивості, тому на даному етапі необхідно корегувати властивості матеріалу деталі, що аналізується, (густина, коефіцієнт теплопровідності тощо), або обрати матеріал із бази даних програми із наперед визначеними властивостями. Також визначаються його основні характеристики (ізотропність, тощо) [118].

Після створення твердотільної моделі генерується її кінцево-елементний аналог, тобто сітка вузлів та елементів. Кількість скінчених елементів, на які розбивається 3-D аналог деталі, впливає на тривалість розрахунків програми, і, найголовніше, на точність отриманих результатів. Більш детальне розбиття деталі, тобто більша кількість скінчених елементів, підвищує точність розрахунків, проте значно збільшує час їх проведення та об’єм файлів. Так, при кількості скінчених елементів у деталі в декілька сотень тисяч (200000…300000), об’єм файлу створеної моделі може сягати 10…20 Гбайт, а час на його обрахунок досягає декількох годин, а грубе розбиття не дасть чіткого відображення результаттів. З метою підвищення точності розрахунків доцільним є більш детальне розбиття на елементи тієї області рами, що безпосередньо межує з місцем прикладання навантаження, в нашому випадку це зварний шов (рис. 2.12).

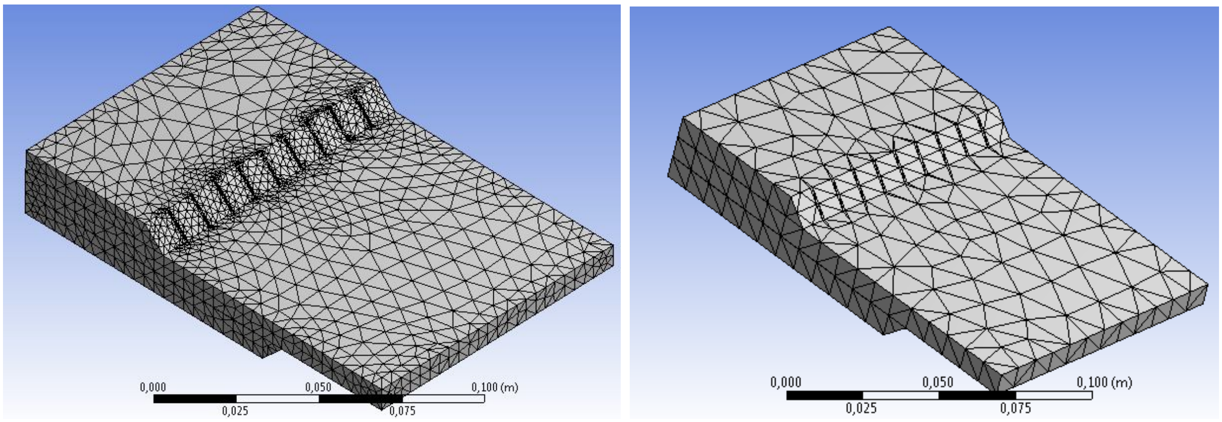


Рисунок 2.12 – 3D-модель ділянки рами з сіткою кінцевих елементів

Наступним кроком є обрання виду процесів, що аналізуються. У випадку моделювання процесів відновлення та підсилення рам методами зварювання доцільним є аналіз теплових процесів, деформацій і напружень, що виникають внаслідок теплової дії. У програмах кінцево-елементного аналізу моделювання зазначених процесів виконується шляхом застосування модуля Thermal-Stress (рис. 2.13), що містить в собі дві системи Transient Thermal та Transient Structural.

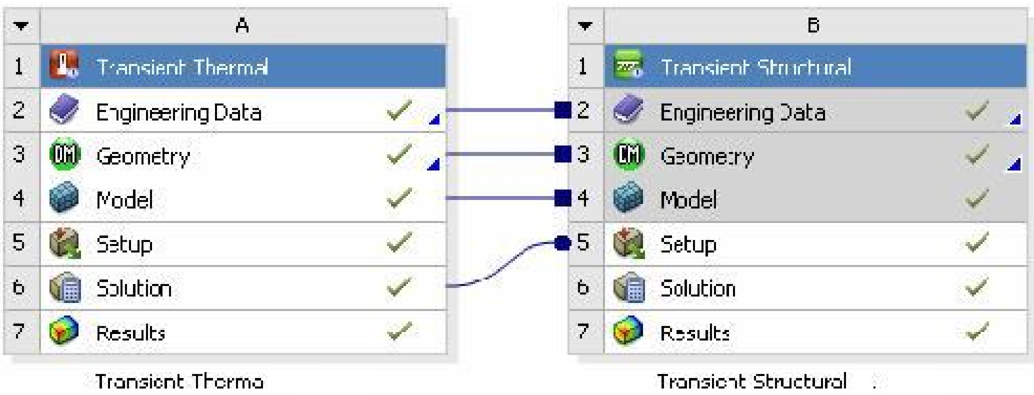


Рисунок 2.13 – Схема встановлення зв’язків між розрахунковими модулями

Спочатку на модулі A (див. рис. 2.13) для аналізу динамічних теплових процесів у деталі, внаслідок дії навантаження у вигляді теплового потоку, підключається система - Transient Thermal. Другим модулем B (див. рис. 2.13) здійснюють аналіз динаміки зміни напружено-деформованого стану рами (Transient Structural), який враховує вплив нерівномірного розповсюдження тепла у деталі від процесу зварювання.

Між двома модулями існує взаємозв'язок, адже в них використовуються такі спільні данні, як 3-D твердотільна модель, її фізико-механічні властивості та кінцево-елементний аналог. Вхідними даними для модуля B є результати розрахунків модуля A, тобто температурне поле в рамі, що було визначене (6 Solution A → 5 Setup B).

Вхідним збуренням під час аналізу процесу зварювання рами розглядаємо рухомий тепловий потік визначеної потужності, що діє від електричної дуги. Рух теплового потоку імітується почерговим введенням тепла на певну ділянку зварного шва. Величина теплового потоку перераховується через потужність процесу зварювання , а також визначається час його дії на даній ділянці, який враховує швидкість зварювання та розміри кінцевих елементів. У кожному наступному кроці розрахунків враховуються результати, отримані на попередніх кроках.

Результатом розрахунків модуля A - Transient Thermal є температурне поле, яке може бути показане у графічному вигляді (рис. 2.14) та масивів чисел, що формуються автоматично. Ці масиви даних є основою для розрахунку деформацій та напружень в матеріалі рами. Тобто, результати розрахунку системи Transient Thermal є вхідними даними, що вводяться у систему Transient Structural (див. рис. 2.13).

Модуль B (Transient Structural) обробляє результати від модуля A (Transient Thermal) і визначає необхідні параметри НДС деталі.

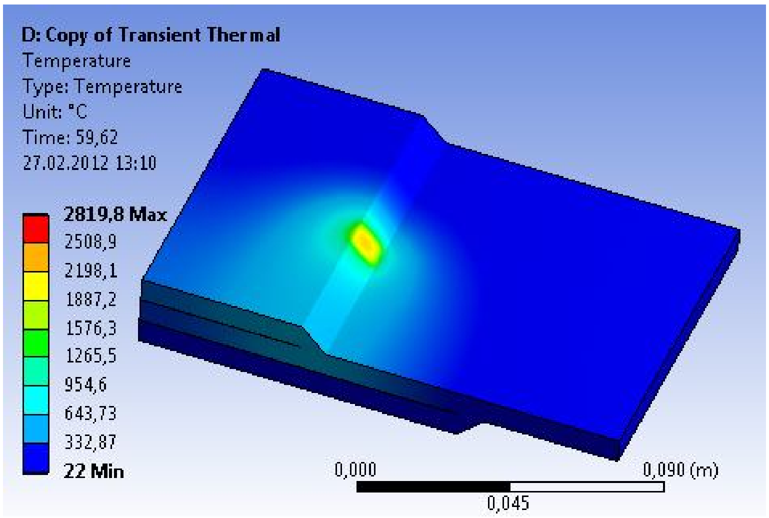
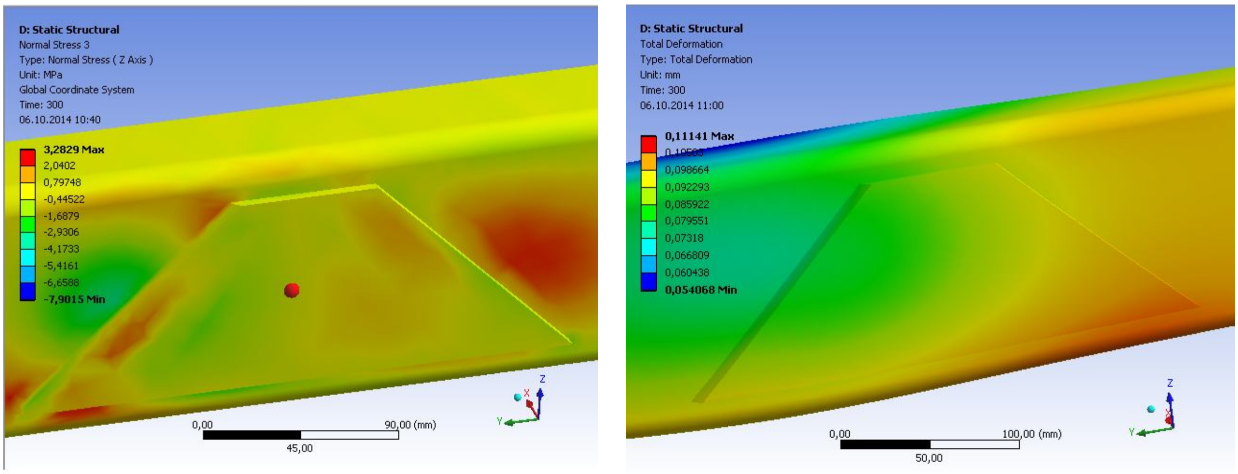


Рисунок 2.14 – Поле розповсюдження температури в матеріалі під час зварювання

Результати можна виводити у вигляді масиву даних або графічно у вигляді полів напружень чи деформацій (рис. 2.15). Приклад протоколу розрахунків показано у додатку Б.



а) б)

Рис. 2.15 – Графічний результат Модуля В (Transient Structural): а) напруження; б) деформації

Таким чином, моделювання процесів у середовищі програм кінцево-елементного аналізу дозволяє отримати ряд параметрів моделі, що можуть бути використані для розробки технологічних операцій ремонту.

РОЗДІЛ 3
МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ РАМИ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ З МЕТОЮ ЛОКАЛІЗАЦІЇ НЕБЕЗПЕЧНИХ ДЛЯ РОЗВИТКУ ПОШКОДЖЕНЬ ДІЛЯНОК

Рама є основним несучим елементом кузова більшості транспортних засобів, на який діє комплекс статичних і динамічних навантажень. У залежності від умов експлуатації та марки автомобілів характерні різні схеми навантаженості їх основних несучих частин. Наприклад, рами автомобілів, що перевозять вантажі, центр ваги яких знаходиться на значній висоті, руйнуються переважно від дії крутильних моментів, що в них виникають. Для інших автомобілів основними факторами, що викликають руйнування рами, є дія поперечних сил або їх поєднання з крутильними моментами. Це унеможливлює узагальнений аналіз усіх конструкцій рам, які, крім того, іноді суттєво відрізняються за конструкцією. Тому, для подальших досліджень було обрано рами автомобілів, які піддаються найбільш широкому спектру навантажень. Це автомобілі, що працюють в лісопереробній галузі, які, переважно, їздять по бездоріжжю і додатково обладнані гідроманіпулятором, що створює додаткові крутильні навантаження на раму під час своєї роботи (рис. 3.1).

Рисунок 3.1 – Автомобілі з гідроманіпулятором

Обстеження ряду оснащених маніпуляторами автомобілів показало, що частота виникнення пошкоджень їх рам значно вища, ніж у інших транспортних засобів. Особливо потрібно відзначити схильність до пошкоджень рам автомобілів з гідроманіпуляторами, встановленими не заводом виробником, а на інших виробництвах без обґрунтування технології та параметрів конструкцій.

3.1 Систематизація пошкоджень рамних конструкцій транспортних засобів, що виникають в процесі експлуатації засобів транспорту

На теперішній час, кількість рам засобів транспорту, що потребують поточного чи капітального ремонту, значно зросла. Найчастіше зустрічаються пошкодження, виявлені під час технічних оглядів автомобілів з встановленим додатковим обладнанням та задіяних у лісопереробній галузі.

Можна виділити ряд причин відмов рам таких автомобілів: збільшилася інтенсивність вантажних перевезень автомобільним транспортом, маневрова робота гідроманіпулятором виконується на підвищених швидкостях, вантажопідємність гідроманіпуляторів збільшилась, що дозволяє скоротити терміни навантаження та розвантаження, але збільшує статичні та динамічні навантаження тощо.

Обстеження ряду таких автомобілів виявило появу втомних тріщин різного роду і направленості в зоні встановлення додаткового обладнання. На подібних автомобілях без додаткового обладнання дефекти виникають значно рідше.

За статистичними даними технічного огляду автомобілів [66] визначено основні зони пошкоджень рам тріщинами:

1 – зона поблизу кріплення силового агрегату;

2 – зона у місці встановлення упорів та підсилень гідроманіпуляторів;

3 – зона зварних швів приварювання елементів рам або попередніх ремонтів;

4 – зони кріплення елементів підвіски мобільних машин;

5 – зони вм’ятин і прогинів, що утворюються в результаті стороннього механічного впливу чи перенавантажень;

6 – зони отворів під заклепки та болти, які є концентраторами напружень.

Експлуатація засобів транспорту з тріщинами не допускається.

Виникнення тріщин і характер їх розвитку в процесі експлуатації в зонах 1,2,3,4 спричинено, переважно, циклічними знакозмінними навантаженнями. Оцінка втомної міцності цих зон проводилась на прикладі дослідження рами автомобіля ЗИЛ 131 з гідроманіпулятором.

Задля забезпечення якісного ремонту на основі практичного досвіду та за результатами виконання держбюджетної теми «Матеріалознавчі аспекти відновлення та підсилення несучих металоконструкцій шляхом приварювання додаткових елементів із спеціальним профілем та властивостями» запропоновано такий алгоритм технологічної підготовки та ремонту рам транспортних засобів.

1. Очищення, миття, зовнішній огляд.
2. Локалізація ділянок з можливими пошкодженнями на основі комп’ютерного моделювання.
3. Дефектування та виявлення виду пошкоджень.
4. Побудова моделі рами з фактичними навантаженнями для характерних випадків, при яких виникають найбільші напруження та деформації у місцях можливих пошкоджень.
5. Визначення розмірів та форми накладок з урахуванням конфігурації полів напружень у матеріалі рами.
6. Вибір способу ремонту чи підсилення пошкоджених ділянок рами.
7. Розробка технології та визначення параметрів процесів ремонту (вибір матеріалів, встановлення режимів).

Дотримання алгоритму дає можливість проводити якісне технічне обслуговування з врахуванням конструктивних особливостей транспортного засобу та особливостей умов експлуатації. А проведені ремонтні роботи з розрахованими режимами та дотриманням техніки виконання – значно збільшити ресурс напрацювання конструкцій.

3.2 Локалізація ділянок рами з можливими пошкодженнями на основі комп'ютерного моделювання

Після проведення підготовчих операцій, пов'язаних з очищенням і зовнішнім оглядом, які пропонується виконувати загальновідомими способами, проводиться визначення ділянок рами, які потребують більш детального дослідження (дефектування).

Для цього використовується тривимірна модель конструкції (рами) і дані про експлуатаційні навантаження машини. Оцінка напружено-деформованого стану рами виконується на її 3–D моделі, що розбивається на просторові твердотільні кінцеві елементи (КЕ) у вигляді тетраедрів з шістьма ступенями свободи в кожному вузлі. Поверхні КЕ моделюються поліномами на основі параболічних функцій. Елемент розбиття має розміри 30-50мм з редукуванням в зонах концентраторів напруг. Елементна модель включає 260409 кінцевих елементів. У моделі враховані кріплення ресор і кузова, які є концентраторами напружень, а також конструкція маніпулятора (рис. 3.2).

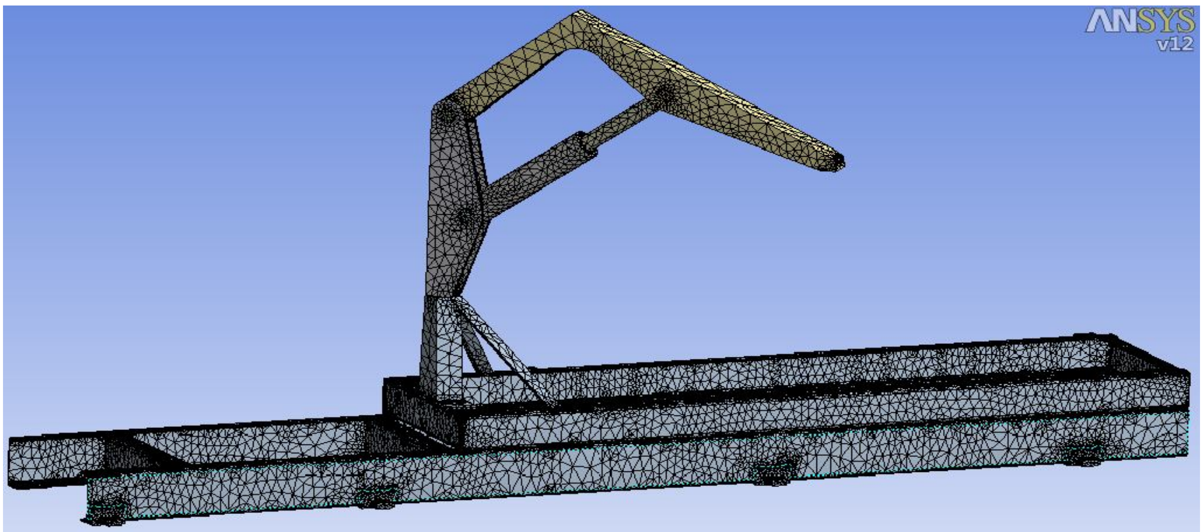


Рисунок 3.2 – Елементна модель рами автомобіля з маніпулятором

Для всіх розрахункових комбінацій навантажень рама закріплювалася в зонах ресорних опор, передня стінка обмежує переміщення в поздовжньому напрямку, бокова у поперечному відносно поздовжньої осі автомобіля. Схема закріплення рами і навантажень показана на рисунку 3.3.

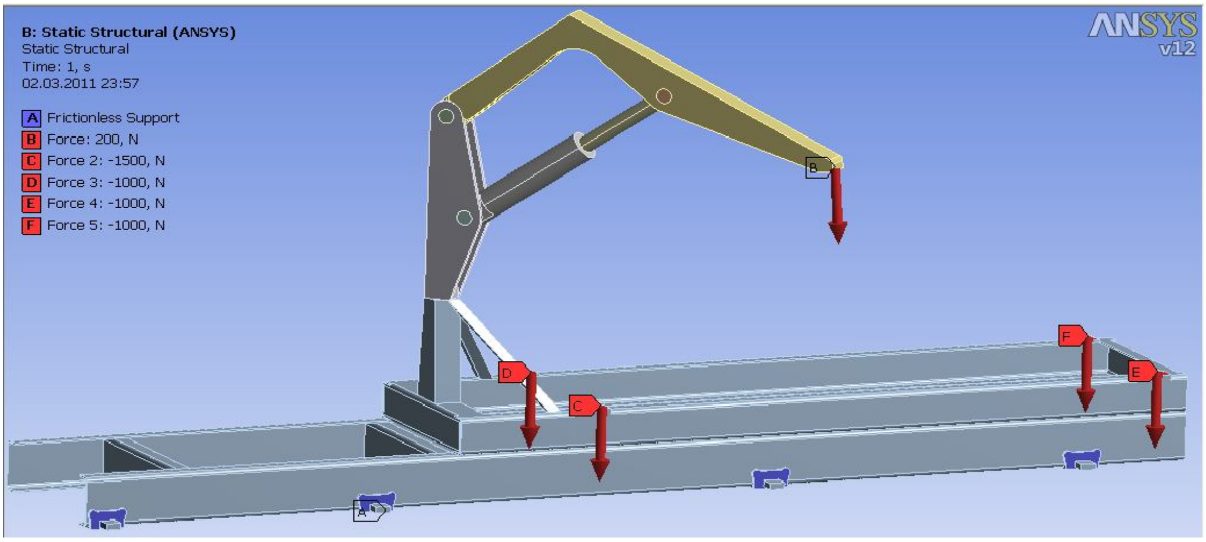


Рисунок 3.3 – Схема сил взаємодії рами з підвісками і прикладені навантаження

Оцінка напружено-деформованого стану рами виконана з моделюванням різних режимів експлуатації: наїзд автомобіля на нерівності дороги, поворот автомобіля з повним завантаженням, в процесі підйому та повороту стріли гідроманіпулятора, з статичними навантаженнями автомобіля з масою вантажу (6,5 т) та вантажем на повному вильоті стріли гідроманіпулятора. Отримані результати розрахунків можуть бути представлені графічно та виводитись у вигляді масиву даних для вказаних точок у будь якому місці моделі рами. Графічний результат виводиться у вигляді різного забарвлення поверхні моделі рами. Колір вказує на певний діапазон значень досліджуваного параметра. Фрагмент результату розрахунку з нанесенням полів напружень показано на рис. 3.4.

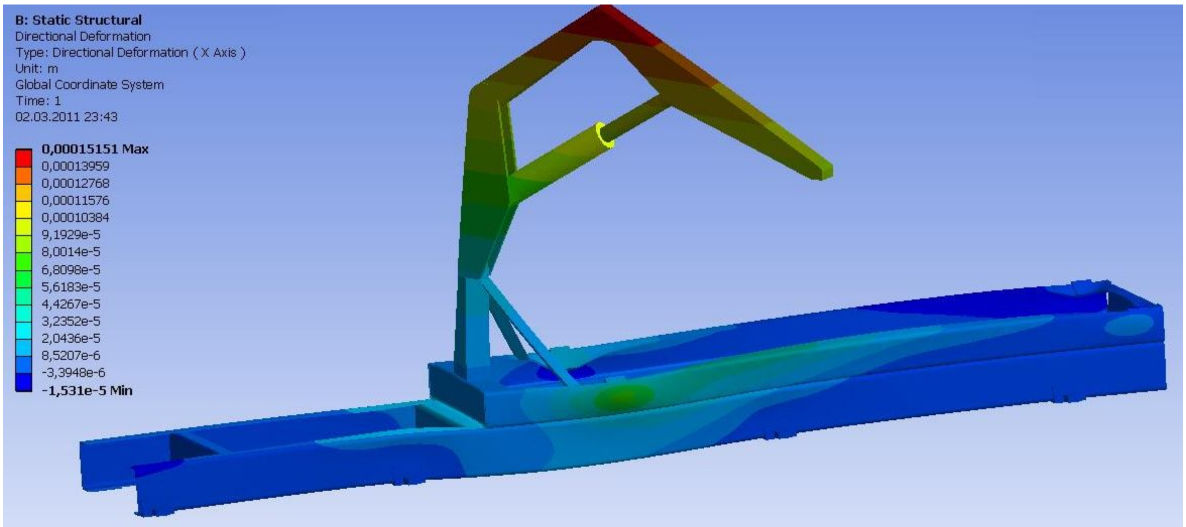


Рисунок 3.4 – Напружено-деформований стан рами з вантажем 65 кН на кузові та 15 кН на повному вильоті стріли гідроманіпулятора

Моделювання дало можливість поділити матеріал рами на зони за рівнем внутрішніх напружень (рис. 3.5): 1 – зони з напруженнями 0,5-0,8 від запасу міцності, які займають біля 21% від об’єму матеріалу рами; 2 – зони з навантаженнями, які близькі до граничних і займають біля 12%, в яких ймовірність виникнення тріщин найбільша. Інший об’єм 3 матеріалу рами малонавантажений та практично не пошкоджується.

Розташування та розміри зон залежать від умов експлуатації, схеми та інтенсивності навантажень на них [53].

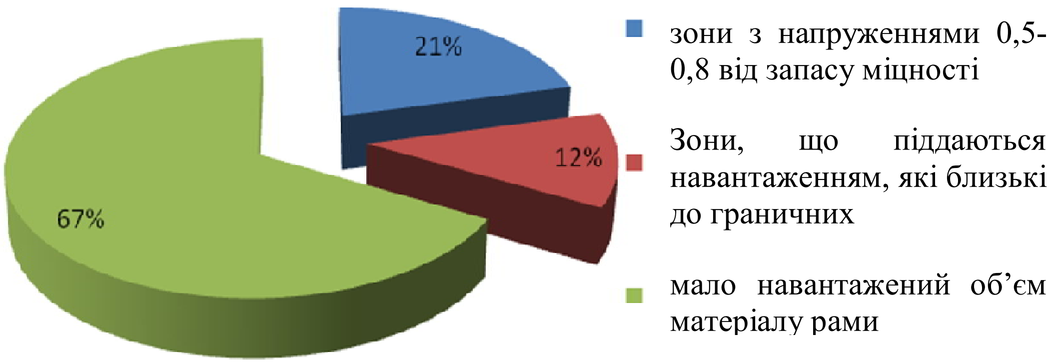


Рисунок 3.5 – Об’єми матеріалу рами автомобіля з різними рівнями напружень

Зони 1 та 2 пропонується дефектувати більш уважно з використанням додаткового обладнання. В зонах 3 матеріал рами практично не пошкоджується, оскільки не несе критичних навантажень, тому, на нашу думку, не потребує поглибленого дефектування.

Дефектування визначених ділянок рам пропонується проводити відомими методами із застосуванням оптичної, флуоресцентної, ультразвукової та іншої апаратури.

Основними дефектами рам є погнутість балок і поперечок, втомні тріщини, тріщини навколо отворів під заклепки, порушення міцності клепаних з'єднань, корозія і інші. Найбільшу небезпеку несуть тріщини, що проходять майже по всьому перерізу балки (лонжерона) рами (рис. 3.6). Дослідження появи і розвитку тріщин показало, що вони зароджувалися з внутрішньої сторони балки і розвивалися у поперечному напрямку з виходом назовні на видиму сторону [115].

а) б)

Рисунок 3.6 – Поперечні тріщини несучих конструкцій:

а – вагонетки, б – рами вантажного автомобіля

Як наслідок, виявити такі тріщини на початкових стадіях їх розвитку без проведення оглядів з використанням спеціальної діагностичної апаратури дуже складно, а в деяких випадках майже неможливо.

На відміну від поздовжніх тріщин, які можна усунути зварюванням, поперечні тріщини потребують розробки індивідуального технологічного процесу з врахуванням багатьох факторів і напружено-деформованого стану всієї конструкції, що дозволить запобігти повторного розтріскування.

Розробка якісного технічного процесу ремонту, визначення режимів, необхідності встановлення елементів підсилення неможливі без встановлення причин та умов руйнування.

3.3 Врахування фактичних навантажень та умов роботи на ділянках рамних конструкцій транспортних засобів з можливими ушкодженнями

На досліджуваному автомобілі з виявленою поперечною тріщиною лонжерона рами встановлено гідроманіпулятор. Дослідженнями, проведеними в попередніх підрозділах роботи встановлено значний вплив на ушкоджені ділянки лонжерона рами схем переміщення вантажу гідроманіпулятором, який створює значні додаткові нормальні сили та крутні моменти. Одні і ті ж операції навантаження-розвантаження автомобіля можуть виконуватись по різних траекторіях переміщення вантажу стрілою гідроманіпулятора, що дозволяє їх оптимізувати за критерієм мінімізації напружень та деформацій у небезпечних зонах [54].

Встановлено, що найбільші напруження та деформації рамної конструкції виникають у зонах примикання розкосів та у місцях накладання нормальних сил та крутильних моментів. Тому напруження та деформації визначали у таких небезпечних зонах (T_1–T_4, рис. 3.7) в околі тріщини в залежності від просторового розміщення навантаженої стріли гідроманіпулятора. На першому етапі визначались напруження в зоні пошкодження, в залежності від кута повороту стріли 1 відносно поперечної осі автомобіля, а потім від вильоту штока гідроциліндра 3, розміщеного на стрілі 1 гідроманіпулятора (рис. 3.7).

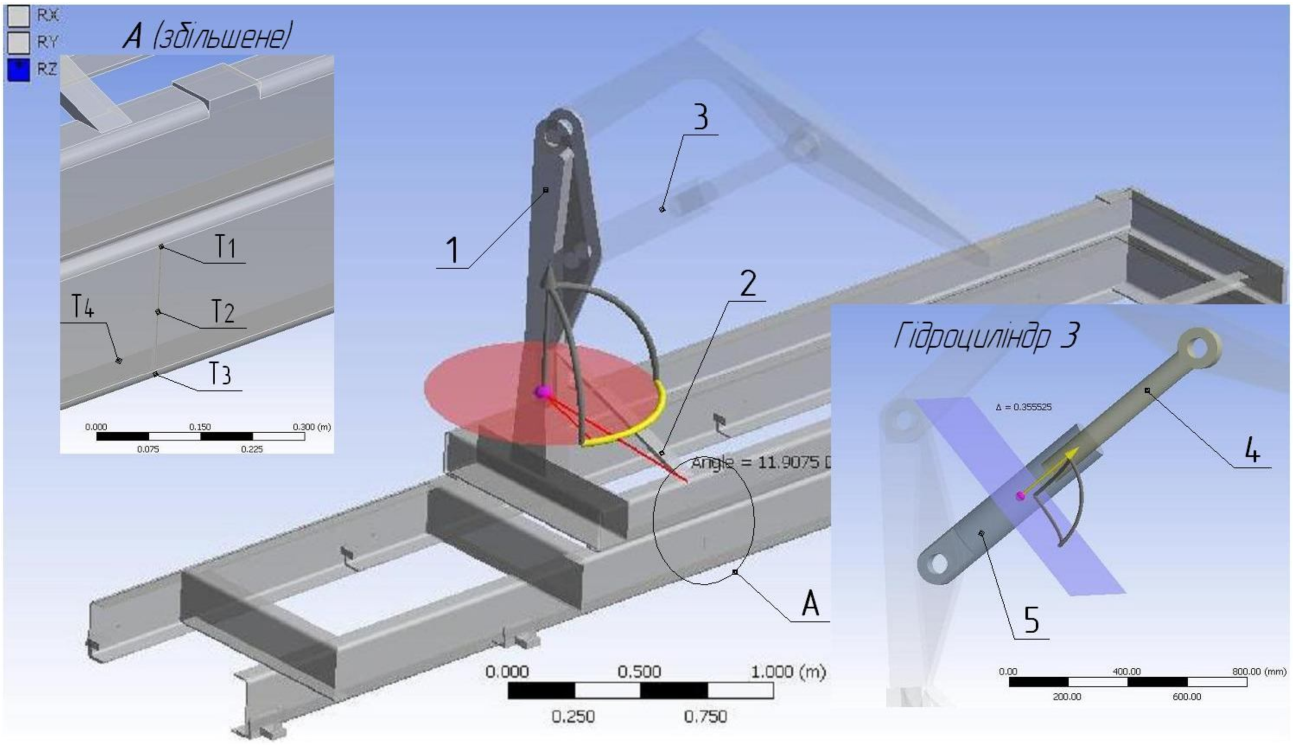


Рисунок 3.7 – Моделювання процесу підйому та повороту стріли гідроманіпулятора

За отриманими з моделі результатами, встановлено, що найбільші напруження та деформації виникають у зоні примикання упора 2 до рами, де і з’явилась тріщина. На основі числових даних побудовані залежності деформацій (рис. 3.8), які виникають в точках тріщи, та напружень (рис. 3.9) від кута повороту стріли гідроманіпулятора. Встановлено, що зона тріщини отримує максимальні навантаження у випадку, коли підйом вантажу проводиться з боку тріщини, а саме тоді, коли упор 2 знаходяться в одній площині зі стрілою 1 під кутом 30˚ відносно поперечної осі автомобіля.

Після визначення найбільш несприятливого кутового положення стріли маніпулятора досліджувався вплив вертикального положення вантажу на напружено-деформований стан рами, який виявився залежним від виходу штока гідроциліндра маніпулятора (рис. 3.10, 3.11).

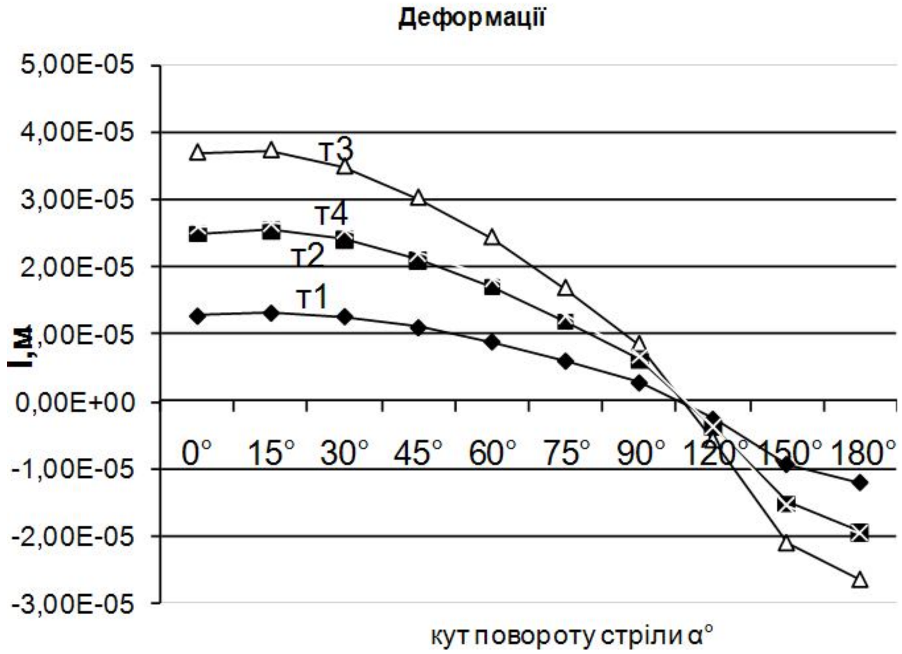


Рисунок 3.8 – Графік залежності деформацій матеріалу рами, які виникають в точках на трасі передбачуваної тріщини, від кута повороту стріли

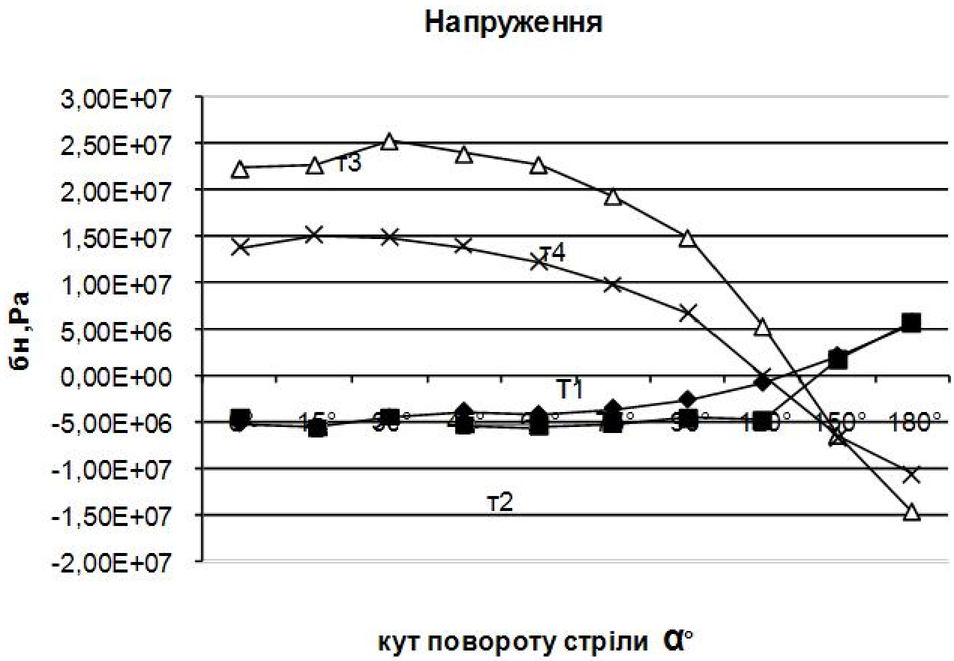


Рисунок 3.9 – Графік залежності напружень в матеріалі рами, які виникають в точках на трасі передбачуваної тріщини, від кута повороту стріли

Основну роботу по підйому підвішеного до стріли гідроманіпулятора вантажу виконує гідроциліндр. Висота підйому вантажу обмежується максимально можливим виходом штока гітроциліндра, тому навантаженість небезпечної ділянки рами визначалась в залежності від його положення.

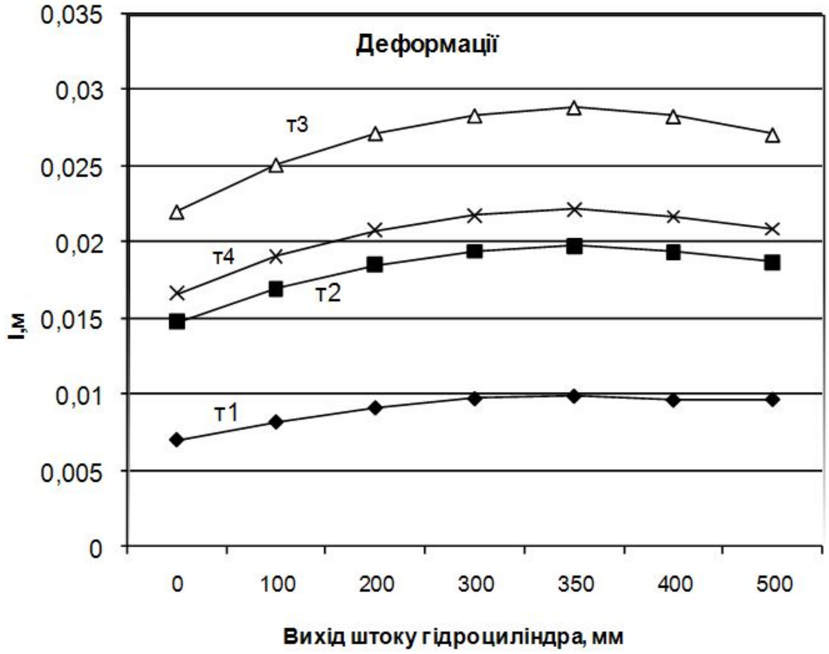


Рисунок 3.10 – Графік залежності деформацій матеріалу рами, які виникають в точках на трасі передбачуваної тріщини від положення штока гідроциліндра стріли

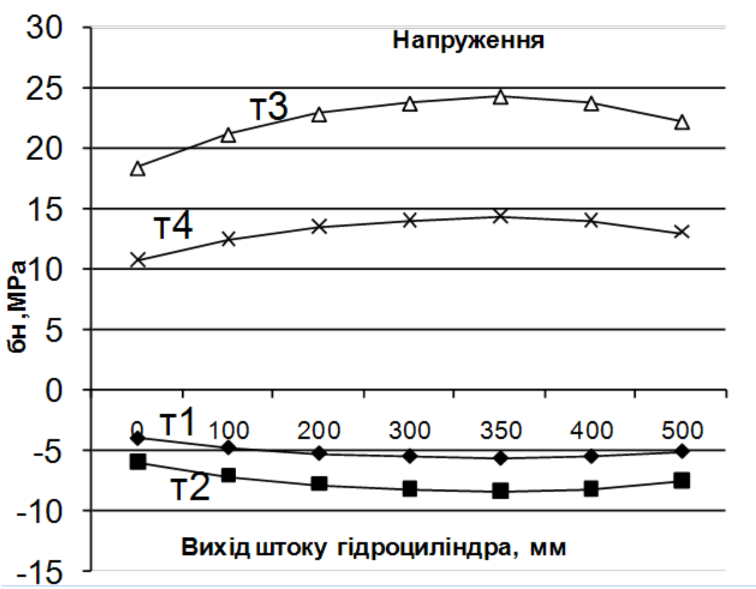


Рисунок 3.11 – Графік залежності напружень в матеріалі рами, які виникають в точках на трасі передбачуваної тріщини в залежності від положення штока гідроциліндра стріли

З графіку напружень (рис. 3,11) видно деяку розбіжність ходу кривих T_1, T_2 та T_3, T_4. Проте, як згадувалось раніше, тріщини починають розвиватися від внутрішнього краю лонжерона, тому пріоритетними для аналізу є дані отримані саме для точок T_4 та T_3.

Запропоновану модель доцільно використовувати для визначення раціональних режимів виконання навантажувально-розвантажувальних робіт на автотранспорті. Наприклад, для лісовозів з маніпулятором, за рахунок оптимальної схеми переміщення вантажу та розташування автомобіля, можна зменшити напруження в небезпечних ділянках рами на 10 % без втрати продуктивності.

Наступним етапом стало моделювання напружено-деформованого стану рами після заварювання тріщини, під дією вантажу, що підчеплений до стріли підйомника і того, що знаходиться у кузові автомобіля. Дослідження показало недостатній запас міцності конструкції після заварювання тріщини, що вимагає додаткового підсилення.

Висновки до розділу 3

1. Обстеження автомобілів з встановленим додатковим обладнанням (навантажувачі, гідроманіпулятори тощо) виявило наявність типових ділянок рам з пошкодженнями, які мають ознаки, що свідчать про їх втомний характер. Найбільш часто ці ділянки межують або охоплюють зони кріплень додаткового обладнання. На подібних автомобілях без додаткового обладнання дефекти у вказаних зонах виникають значно рідше.

2. Такі автомобілі повинні проходити технічний огляд рам з більшою частотою. Ефективність діагностування можна підвищити шляхом використання комп’ютерного аналізу рами із застосуванням кінцевоелементного аналізу та з врахуванням умов експлуатації. Результати такого комп’ютерного аналізу дають можливість розділити раму на зони з

різними рівнями напружень, що в них виникають. Запропоновано розділити раму за рівнем напружень на 3 зони з різною ймовірністю появи тріщин:

1) – напруження досягають 0–0,5 від допустимих напружень;

2) – напруження досягають 0,5–0,8 від допустимих напружень;

3) – напруження досягають більше 0,8 від допустимих напружень.

Ділянки рами, що відносяться до третьої зони рекомендується дефектувати з використанням додаткових засобів більш ретельно.

3. Рекомендується для формування технологій та окремих операцій використання автомобілів застосовувати запропоновану модель для визначення раціональних режимів їх виконання. Наприклад, для лісовозів з маніпулятором за рахунок оптимальної схеми переміщення вантажу та розташування автомобіля можна зменшити напруження в небезпечних ділянках рами на 10 % без втрати продуктивності.

РОЗДІЛ 4
ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСІВ РЕМОНТУ РАМНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Якість та міцність зварного шва залежить від багатьох факторів, проте його форма та розміри, у більшості випадків, стають визначальними для оцінки цих показників.

Форма шва залежить від цілого ряду параметрів процесу зварювання: сили струму, падіння напруги на дузі, довжини дуги, полярності та роду струму, швидкості зварювання, складу захисного покриття електроду і т. д. Однак, при призначенні режиму зварювання у виробничих умовах не враховується частина факторів, що мають значний вплив на процес зварювання і проплавлення металу. До них відносяться кути нахилу електрода та їх зміна в процесі зварювання.

4.1 Дослідження факторів впливу на технологію встановлення елементів підсилення рами

4.1.1 Визначення розмірів та форми накладок за картиною полів напружень

Форма та переріз накладки визначались з використанням розробленої моделі. Для цього використано, отримані у попередньому розділі, результати визначення параметрів напружено-деформованого стану рами. За конфігурацією полів напружень на поверхні рами виділяються зони з різними рівнями напруженості від максимального σ_1 до мінімального σ_n, де n – кількість рівнів. Форма накладки обирається так, щоб повністю перекривались зони з небезпечними для виникнення тріщин напруженнями. На рис. 4.1 ці зони позначені σ_1 та σ_2.

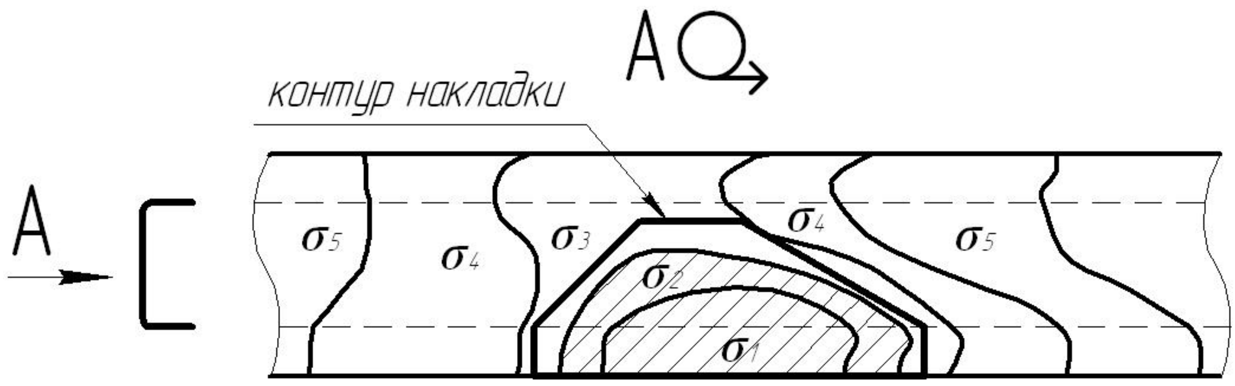
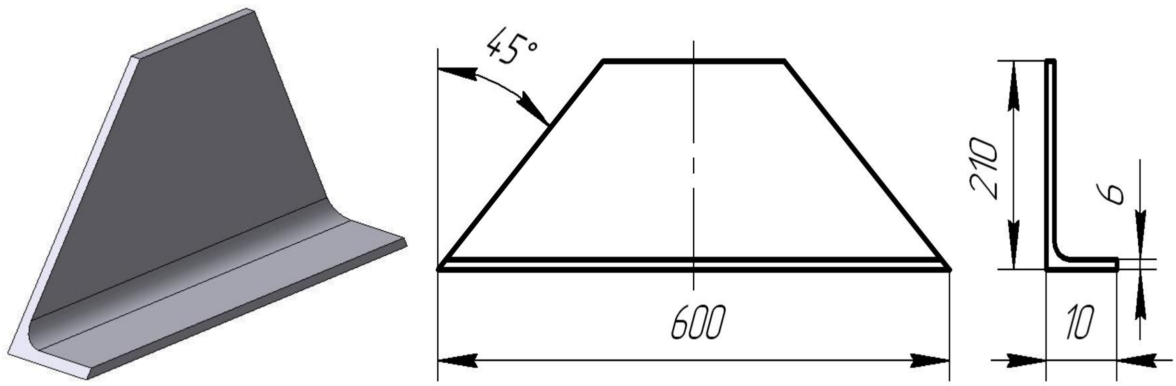


Рисунок 4.1 – Поля напружень на розгортці ділянки рами з встановленими підсилювальними накладками

Встановлено, що в нашому випадку для підсилення доцільно використовувати накладку вирізану з кутника або швеллера у формі трапеції (рис. 4.2) .



а) б)

Рисунок 4.2 – Підсилювальна накладка: а – 3D модель, б – ескіз

Відомі різні варіанти встановлення накладок. Вони можуть встановлюватись з однієї сторони ділянки, що підсилюється, або дублюватись з протилежної. Розміри накладок, що дублюються, можуть бути однаковими або різними.

Монтаж накладок виконується шляхом накладання по контуру накладки зварних швів.

Для вибраної конструкції змодельовано процес встановлення накладки для підсилення лонжерона рами з однієї сторони. Встановлено, що після приварювання накладки у зоні температурного впливу зварювальної дуги виникають залишкові напруження (рис. 4.3). Вони можуть призвести до повторного руйнування відновленої ділянки в процесі експлуатації.

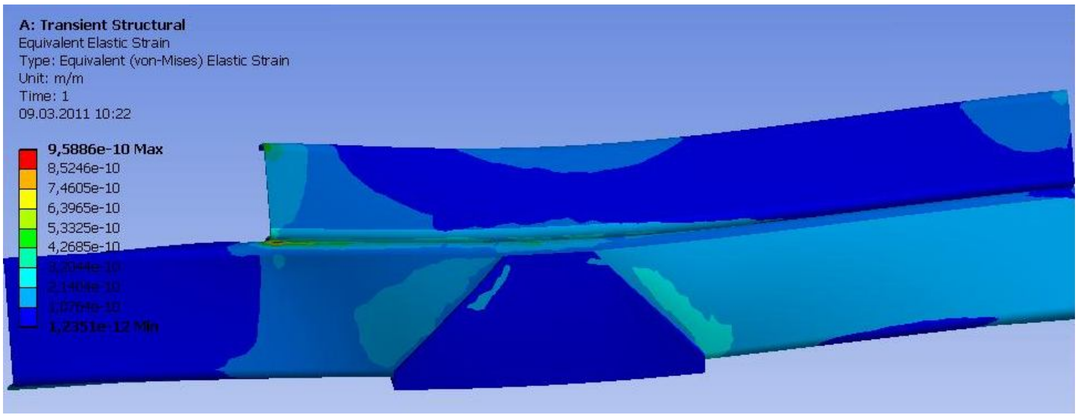


Рисунок 4.3 – Напруження у зоні температурного впливу зварювальної дуги

Відомими способами можна зменшити залишкові напруження після зварювання: (термічна обробка, проклепування), але більш доцільним є їх мінімізація ще до появи за рахунок використання раціональної технології приварювання. Для вирішення цієї задачі накладку пропонується дублювати з меншими розмірами, однаковою формою, а також визначити раціональні розміри і режими.

Важливе значення має взаємний вплив теплових полів процесів накладання паралельних швів приварювання обох накладок на залишкові напруження та деформації, а також вплив на них відстані між зварними швами b (рис 4.4). Вивчення досвіду зварювання дозволило встановити, що зона температурного впливу для прокату, подібного до використаного в рамі, має протяжність в межах від 5 до 30 мм, що і використано в якості вхідних даних для подальших досліджень.

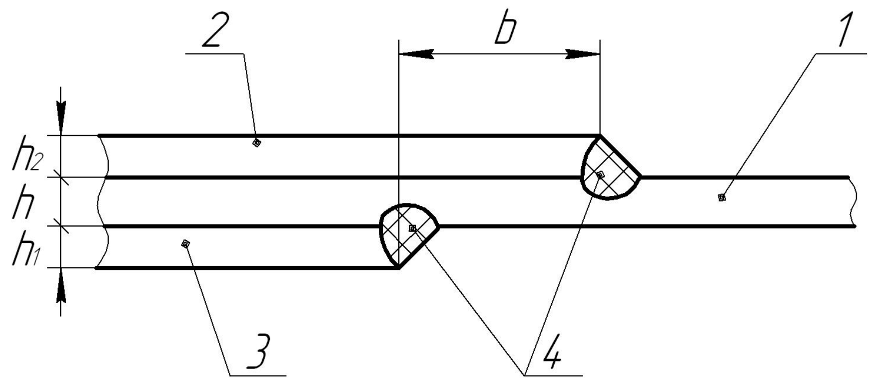


Рисунок 4.4 – Схема приварювання елементів підсилення рами (у перерізі):
1 – метал рами ; 2,3 – метал елементів підсилення ; 4 – зварювальні шви

Важливим результатом цих досліджень є визначення конкретних конфігурацій температурних полів в рамі, швидкості охолодження зварюваної ділянки рами та взаємного тепловпливу процесів при виконанні паралельних швів. Остаточнм результатом досліджень, що дає інформацію для прийняття рішень, є напружено-деформований стан місця зварювання.

4.1.2 Розробка технології приварювання накладок для підсилення

Під час зварювання процес розповсюдження теплоти в матеріалі деталі має змінні параметри. Це пояснюється значною тривалістю дії та потужністю джерела теплоти, якими є зварювальна дуга та ванна розплаву. Форма і розміри ізотерм є асиметричними і суттєво змінюються в залежності від сумарної товщини перерізу, відстані між зварними швами та часу, що проходить між проходженням зварної дуги через точки перетину довільно побудованої нормалі та осі зварних швів. За рахунок відносно невеликої відстані між зварними швами вони піддаються попередньому і супутньому підігріванню, які у практиці вважаються одними з найбільш дієвих технологічних засобів по зменшенню залишкових напружень і знижують вірогідність появи холодних тріщин. Поява холодних тріщин пов'язана з наявністю в конструкційних сталях цього класу таких легувальних елементів як марганець, хром, молібден та ін, що знижують температурний інтервал γ-α перетворення. Тому, при зварюванні в зоні термічного впливу зростає ймовірність утворення гартівних структур і знижується опірність утворенню холодних тріщин.

Нами визначено температури взаємопідігрівання зварних швів при встановленні накладок для підсилення. На графіку (рис. 4.5) показано зміну величини підігріву зони накладання наступного шва в залежності від відстані b між ними (див. рис. 4.4). Температура підігріву обирається з врахуванням товщини стінки деталі h, температури навколишнього середовища $t_{сер}$ ступеню легування сталі $C_{екв}$ та типу покриття електрода, і,у нашому випадку, повинна становити 150–200 ^{o}C. Розраховано, що при тепловкладенні 20 Вт/мм^2 та швидкості зварювання 9 м/год дана умова забезпечується при виконанні зварних швів на відстані не більше 25 мм.

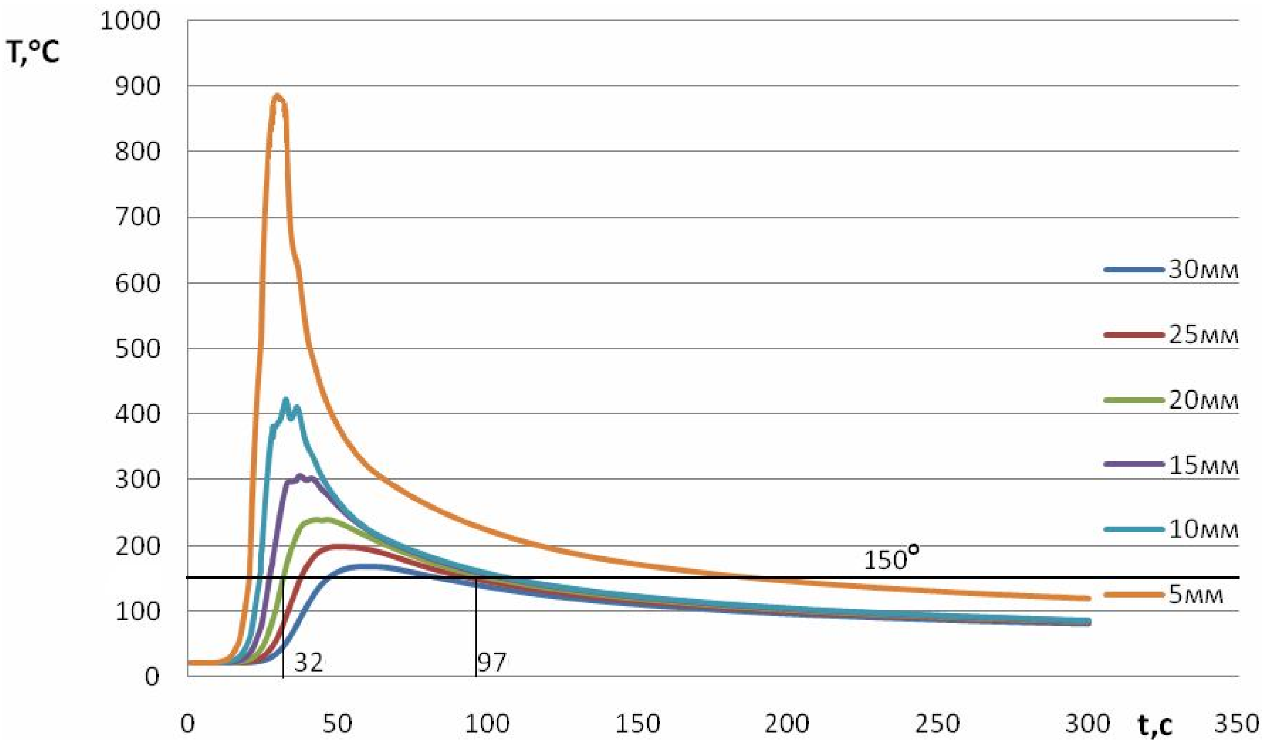
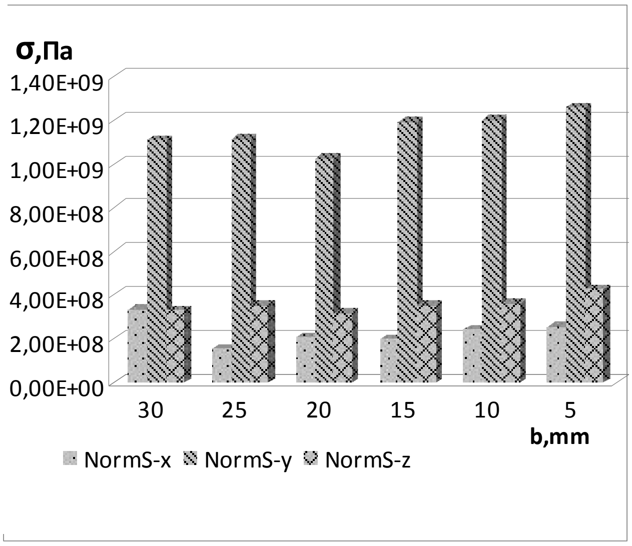
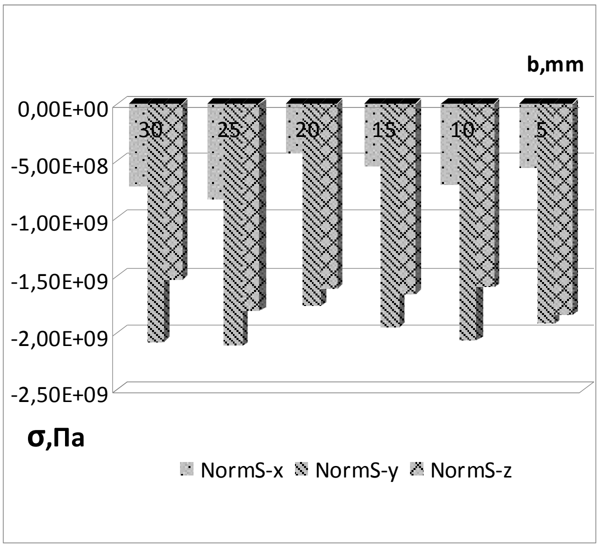


Рисунок 4.5 – Термограми зони взаємопідігрівання швів, що виконуються з різною відстанню b на дублюючих накладках

Під впливом нерівномірного розповсюдження тепла по об’єму рами виникають різні за величиною та знаком напруження σ, максимальні піки яких зображені на рисунку 4.6.





а) б)

Рисунок 4.6 – Піки поточних напружень по осях x, y, z:

а) розтягу; б) стиску

У випадку досягнення значень внутрішніх напружень в матеріалі вище границі текучості заготовка починає пластично деформуватися. Деформації рами в залежності від відстані b між зварними швами, які виникають в результаті приварювання елементів підсилення, зображені на рисунку 4.7.

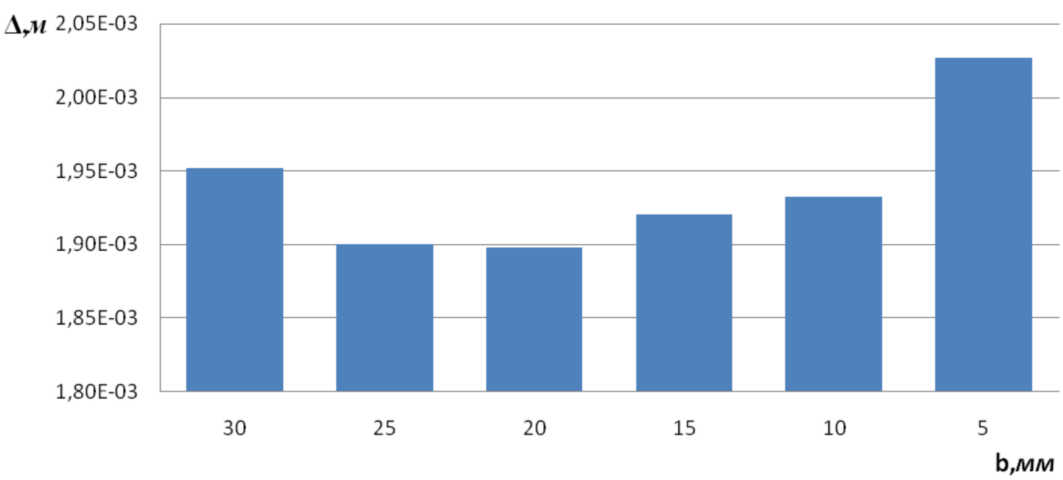


Рисунок 4.7 – Піки поточних деформацій

З рисунку 4.7 слідує, що оптимальна відстань між зварними швами з точки зору зменшення деформацій, яким піддається конструкція в процесі зварювання, становить 20–25 мм. Для подальших досліджень вибрано відстань між паралельними швами накладок, що приварюються з обох сторін рами, яка становить b = 20 мм.

Для вибраної конструкції розроблено технологічний процес, який передбачає монтаж підсилювальних накладок короткими швами 1–6, які виконували по черзі з обох сторін у шаховому порядку (рисунок 4.8). Початок та кінець зварювання рекомендується проводити на ділянках профілю, що розташовані вздовж рами, де вірогідність появи тріщин найменша. За нашими розрахунками, з врахуванням вище викладених рекомендацій, в зоні накладання чергового шва температура повинна становити 150 °С. Період часу на протязі якого ця температура забезпечується у точці, де починається зварювання наступного кроку паралельного шва та за умови відстані між швами b = 20мм, визначається за рис. 4.5 і становить 65 секунд. З цього періоду 35 секунд необхідно для зміни місця зварювання, а 30 секунд відводиться на виконання певної ділянки шва. При цьому, для швидкості зварювання 9м/год довжина ділянки шва буде становити 75мм.

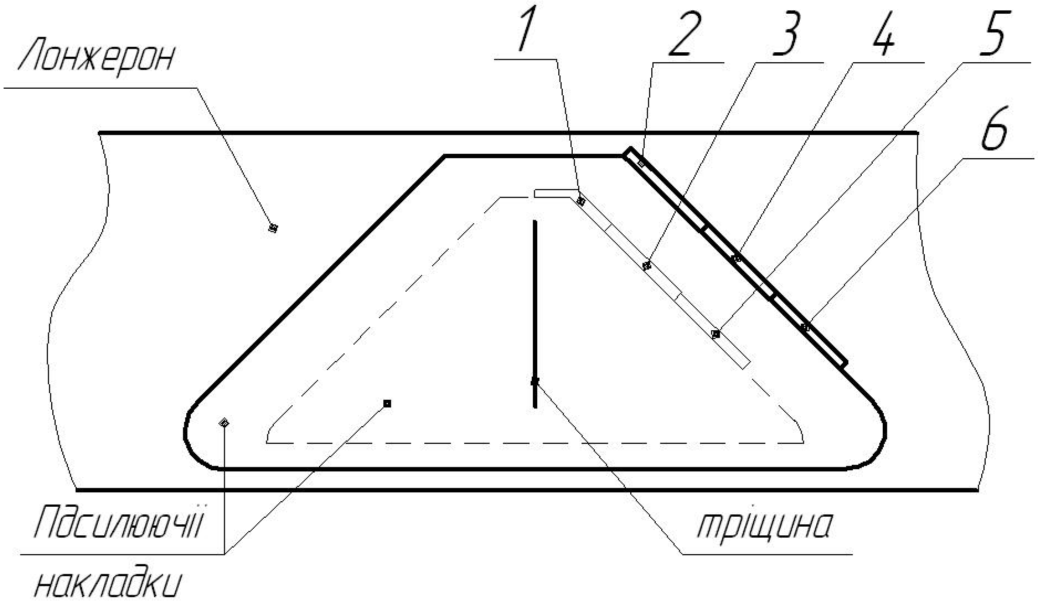


Рисунок 4.8 – Схема встановлення підсилювальних накладок:

1 – 6 – послідовність виконання зварних швів

Використання описаної вище методики для заварювання дозволило знизити на 15% відсотків поточні напруження і на 12% деформації.

На наступному етапі вирішувалась задача зменшення температурних перепадів, які спричиняють локальні теплові напруження, що перевищують границі міцності матеріалу і спричиняють загрозу появи мікротріщин. Цього можна досягти не тільки зменшенням рівня тепловкладення в деталь на етапах визначення режимів зварювання і вирівнюванням тепловкладення по об’єму, шляхом проектування відповідної послідовності накладання швів, але і за рахунок зміни форми і розмірів підсилюючих елементів. Дослідження показали найбільшу концентрацію напружень в місцях накладки, де зварний шов змінює напрям під гострим кутом, тому їх пропонується округлювати (див. рис. 4.8).

4.1.3 Вплив радіусу округлення кутів елементів підсилення на НДС лонжерона рами

Найбільш поширені елементи підсилення мають форму прямокутників, паралелограмів та інших чотирикутників з прямолінійними сторонами. Аналіз наукових досліджень та оглядів з питань руйнувань рамних конструкцій показує, що їх повторне руйнування нерідко відбувається у місцях приварювання накладок, а тріщини беруть свій початок від гострих кутів елементів підсилення. Крім того, в процесі приварювання накладки біля кожного з її кутів потрібно переривати процес зварювання, а це, в свою чергу, підвищує кількість пор і включень, що є таж концентраторами напружень і зародками тріщин.

Для розробки рекомендацій щодо раціональної форми накладок для підсилення проведено моделювання термонапруженого стану процесу приварювання накладок з різними радіусами округлення з метою визначення небезпечних зон концентрації напружень.

На рис.4.9 показані результати моделювання процесу приварювання накладок для підсилення з заокругленням гострих кутів. Виявилось, що приварювання накладки, виготовленої без округлення, супроводжується суттєвим підвищенням температури біля гострих кутів її контуру по відношенню до випадку, коли контур виготовлявся з радіусами більше 15мм.

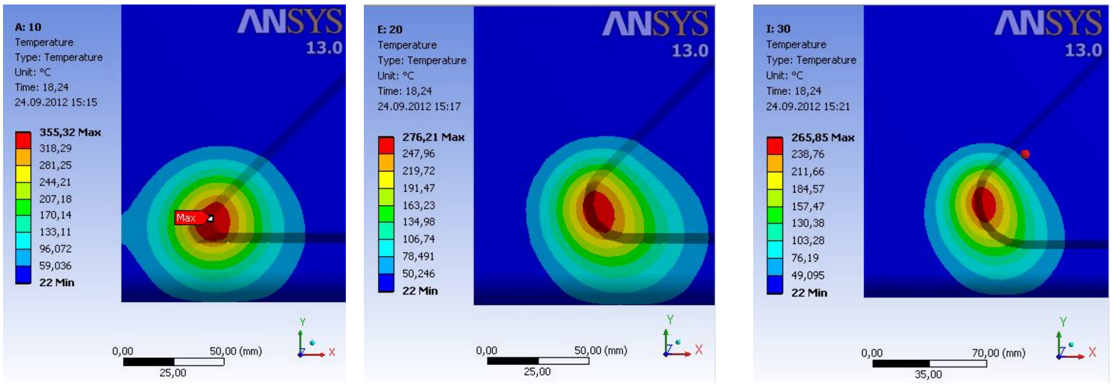


Рисунок 4.9 – Розподіл температурного поля по об’єму рами з різними округленнями контуру накладки

Також встановлено, що використання накладок з контурами, у яких радіуси округлень невеликі призводить до підвищення нерівномірності напружень та деформацій (рис. 4.10, 4.11). Використання плавних переходів (округлень) дозволяє забезпечити більш рівномірне розподілення напружень та деформації по об’єму заготовки, знімаючи тим самим концентратори напружень.

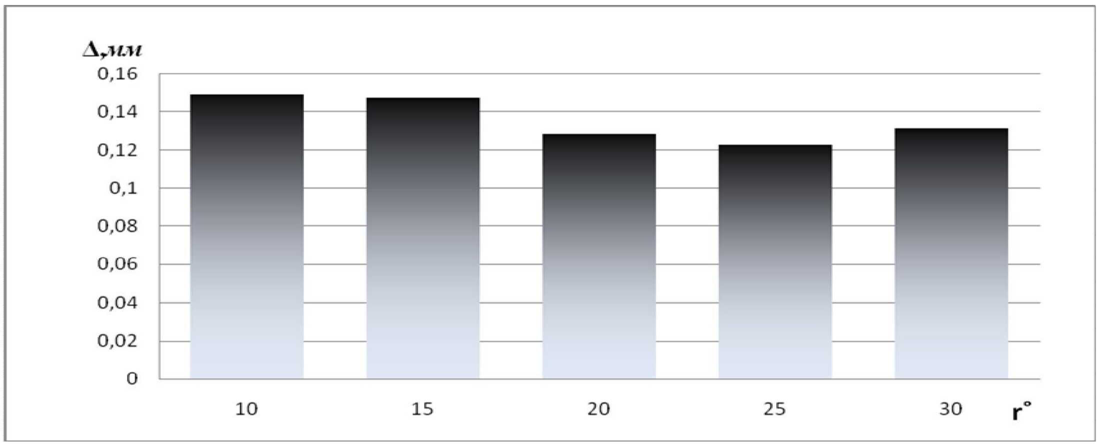


Рисунок 4.10 – Розподіл поля деформацій для контурів накладок з різними радіусами округлень

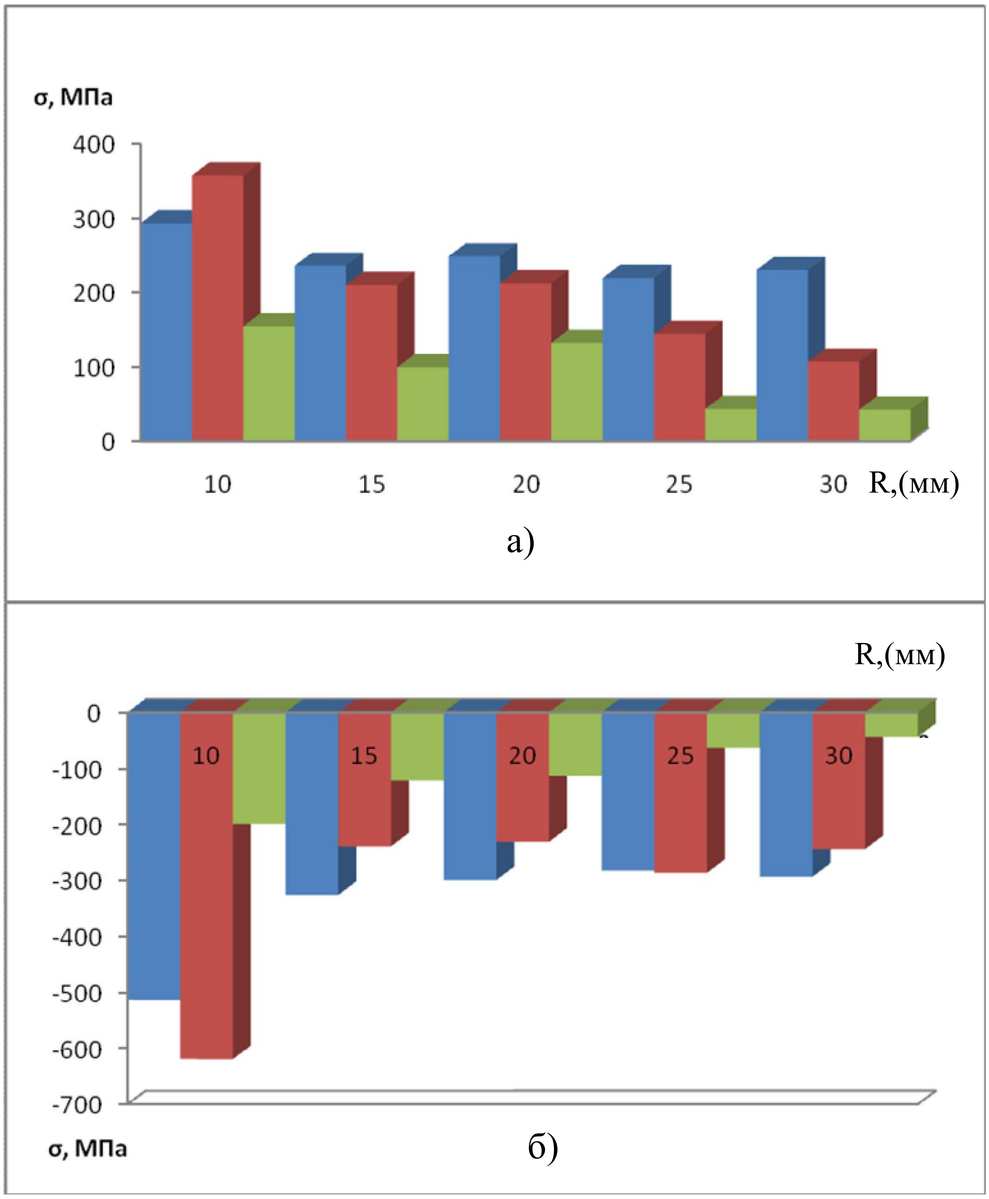


Рисунок 4.11 – Максимальні напруження в матеріалі рами під час приварювання накладок по осях x, y, z:
а) розтягу; б) стиску

Аналіз діаграм напружень показує, що збільшення радіуса округлення контура елемента підсилення до 15 мм зменшує значення напружень та деформацій, а подальше збільшенням радіуса майже не впливає. Тому, можна зробити висновок, що округлення гострих кутів контурів елементів підсилення доцільне з радіусом в межах 15–20мм, що дозволяє зменшити поточні деформації на 10 % , а напруження майже вдвічі.

4.2 Компенсація та зменшення впливу негативних факторів зварювання під час встановлення накладок для підсилення рамних конструкцій засобів транспорту

Найбільш небажаними негативними результатами процесу зварювання є температурні напруження та деформації в конструкції, а також небажані фазові перетворення у шві та навколошовній зоні.

На (рис. 4.12) показана схема зварного шва та точка А в зоні термічного впливу, у якій визначається температура та деформації.

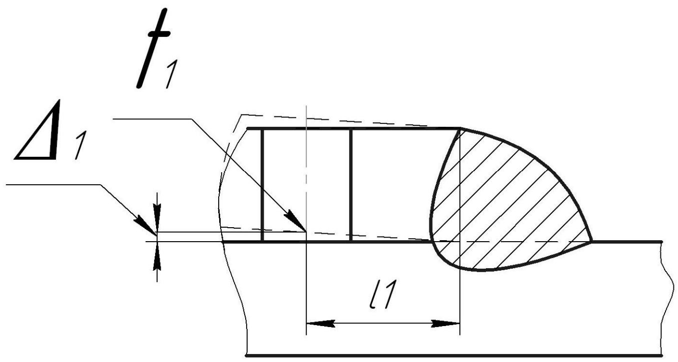


Рисунок 4.12 – Основні розміри (геометрія) зварного шва

Серед основних факторів, що визначають геометрію зварного валика, можна виділити діаметр електродного дроту *d*, швидкість зварювання $v_н$, напругу на дузі *U*, кут нахилу електроду *a*.

Постає актуальна задача, яка полягає у визначенні оптимальних значень параметрів процесу зварювання, що забезпечують необхідну глибину проплавлення при мінімальному нагріванні деталі і, відповідно, її деформуванні. Це дозволяє скоротити можливість появи тріщин за рахунок мінімізації тепловкладення, і, як наслідок, підвищити ефективність процесу та строк служби виробу.

Визначимо параметри, які найбільше впливають на температурні поля та деформації в процесі приварювання підсилювальних елементів внапуск.

Швидкість зварювання пов'язана із товщиною металу підсилювального елемента, її збільшення призводить до пропорційного зменшення швидкості зварювання. Збільшення діаметра електродного дроту дозволяє прямопропорційно збільшити швидкість зварювання, що було встановлено попередніми дослідженнями. Приймемо як варіативні такі параметри: швидкість зварювання $v_н$, напруга на дузі U, кут нахилу електроду a.

Для розв'язання поставленої задачі розробимо математичну модель, яка описує вплив визначених параметрів ($v_н$, U, a) на температуру та деформації (t, Δ). Доцільним є використання методу планування та постановки повного факторного експерименту з проведенням регресійного аналізу [119–121].

Експерименти проведені з використанням інверторного зварювального джерела живлення, стенда для вимірювання температури та деформації. Зварювання проводили електродом 3мм на зразках із сталі 09Г2С. Зварювання проводилось на зворотній полярності.

Попередньо отримана лінійна модель показала її неадекватність. Тому доцільно використати апроксимацію функції відгуків y_z та y_a поліномом другого порядку виду [120]

$$y = b_0 + \sum_{1 \le i \le k} b_i x_i + \sum_{1 \le i \le l \le k} b_{il} x_i x_l + \sum_{1 \le i \le k} b_{il} x_i^2 , \qquad (4.1)$$

де x_i - фактори

b_i - коефіцієнти поліному

Інтервали варіювання та рівні факторів приведені в таблиці 4.1.

Для кожного окремого експерименту було виготовлено комплект заготовок, з яких в процесі зварювання знімались дані температур і деформацій. Вимірювання температур проводили за допомогою термопар, дані з яких передавались на комп'ютер, а деформації вимірювались індикаторами з точністю 0,01 мм та фіксувались відеокамерою. Матриця рототабельного планування експерименту другого порядку для трьох факторів та результати дослідів показано у таблиці 4.2.

Таблиця 4.1 – Інтервали варіювання та рівні факторів впливу на стан деталі під час зварювання

Фактори	Інтервали варіювання	Рівні факторів		
		основн. 0	верхн. +1	нижн. -1
x_1 – напруга на дузі, В	8	30	38	22
x_2 – швидкість зварювання, м/год	4,7	9,5	14,2	4,8
x_3 – кут нахилу електроду	15	45	60	30

Таблиця 4.2 – Матриця центрального композиційного плану другого порядку для трьох факторів

Склад плану	№ дос.	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	y_a	y_z
План типу 2^3	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	880	0,17
	2	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	451	0,09
	3	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+	354	0,14
	4	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	188	0,07
	5	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	694	0,1
	6	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	361	0,05
	7	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	323	0,08
	8	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	172	0,04
«Зоряні» точки	9	+	+α	0	0	0	0	0	α^2	0	0	195	0,84
	10	+	-α	0	0	0	0	0	α^2	0	0	210	0,21
	11	+	0	+α	0	0	0	0	0	α^2	0	140	0,6
	12	+	0	-α	0	0	0	0	0	α^2	0	280	0,28
	13	+	0	0	+α	0	0	0	0	0	α^2	142	0,13
	14	+	0	0	-α	0	0	0	0	0	α^2	244	0,11
Нульова точка	15	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	209	0,49
	16	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	216	0,57
	17	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0,39
	18	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	212	0,66
	19	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0,51
	20	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	215	0,55

На кожному зразку значення t та Δ визначали як середнє значення із 16 вимірювань. В стовпчиках y_a та y_Z таблиці 4.2, відповідно, приведено середні значення температури, спричиненої зварювальною дугою, та деформації.

За формулами (77-80) [121] знайдено коефіцієнти рівняння регресії для функцій $y_a = f(U, v_н, a)$ та $y_z = f(U, v_н, a)$. Дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії визначено за формулами (81-84) [121]. Результати розрахунків зведено до таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати досліджень за планом експерименту

Коеф. р-ння	y_a				y_z			
	Знач. коеф.	$s^2\{b\}\cdot10^{-3}$	Δb ±	Значе-мість	Знач. коеф.	$s^2\{b\}\cdot10^{-3}$	Δb ±	Значе-мість
b_0	-12,104	0,55	0,06	+	0,537	1,35	0,094	+
b_1	78,981	0,24	0,04	-	0,095	0,59	0,063	+
b_2	98,596	0,24	0,04	+	0,045	0,59	0,063	-
b_3	23,523	0,24	0,04	+	0,017	0,59	0,063	+
b_{12}	55,6	0,41	0,052	-	0,0025	1,01	0,082	-
b_{13}	13,884	0,41	0,052	+	0,0075	1,01	0,082	+
b_{23}	28,643	0,41	0,052	+	0,0025	1,01	0,082	-
b_{11}	90,053	0,23	0,039	-	-0,056	0,56	0,061	-
b_{22}	90,08	0,23	0,039	-	-0,086	0,56	0,061	-
b_{33}	90,02	0,23	0,039	+	-0,199	0,56	0,061	+

З врахуванням значимості коефіцієнтів рівняння регресії приймуть вигляд:

$$y_a = -12{,}104 + 98{,}596 \cdot x_2 + 23{,}523 \cdot x_3 + 13{,}884 \cdot x_1 \cdot x_3 + 28{,}643 \cdot x_2 \cdot x_3 + 90{,}02 \cdot x_3^2, \qquad (4.2)$$

$$y_z = 0{,}537 + 0{,}095 \cdot x_1 + 0{,}017 \cdot x_3 + 0{,}0075 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0{,}199 \cdot x_3^2. \qquad (4.3)$$

Адекватність отриманих моделей перевірялась за критерієм Фішера [117]. При 5%-му рівні значимості табличне значення критерію становить $F_т$ =

4,7. Розрахункові значення критеріїв склали F_{a_p} = 3,85 та F_{z_p} = 4,4. Так як розрахункові величини менше табличного значення, моделі вважаються адекватними.

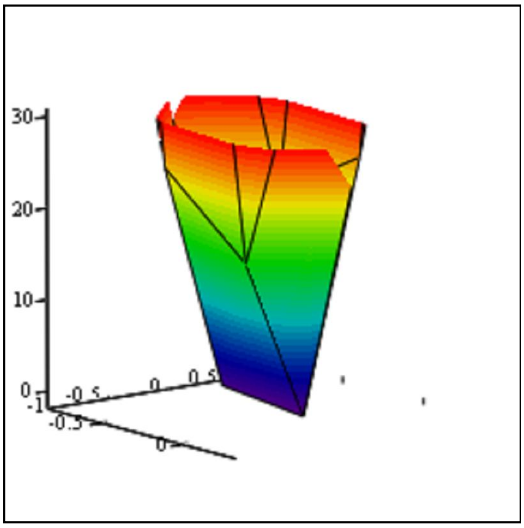
За отриманими моделями (рівняннями регресії), при фіксації одного із параметрів процесу приварювання елементів підсилення, отримуємо поверхні відгуків, що наглядно показують влив інших значень параметрів на температуру та деформації, спричинені горінням зварювальної дуги.

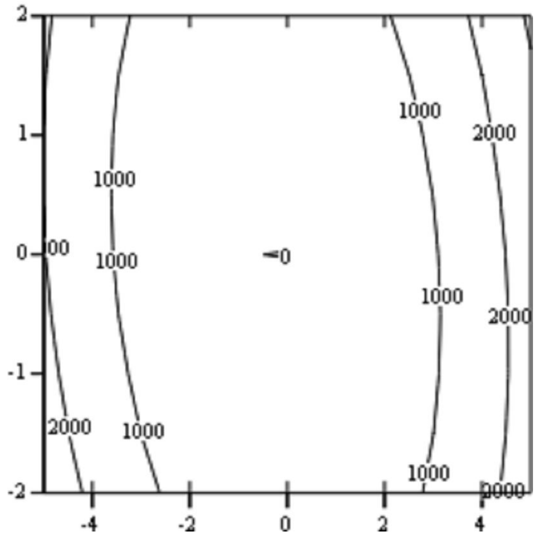
Шляхом використання отриманих математичних моделей (формули 4.2, 4.3) можна розв'язувати ряд задач, які виникають під час проектування технологічних процесів, що використовують процеси дугового зварювання. Серед них найчастіше постають задачі мінімізації напружень та деформацій, яким піддаються деталі (рис. 4.2), а також задача мінімізації тепловкладення з метою запобігання структурним перетворенням, що мають місце в зоні температурного впливу.

На рисунках 4.3–4.8 показані поверхні відгуків, що відображають вплив напруги на зварювальній дузі, швидкості та кута нахилу електроду на температуру та деформації на відстані 5 мм від зони зварювання.

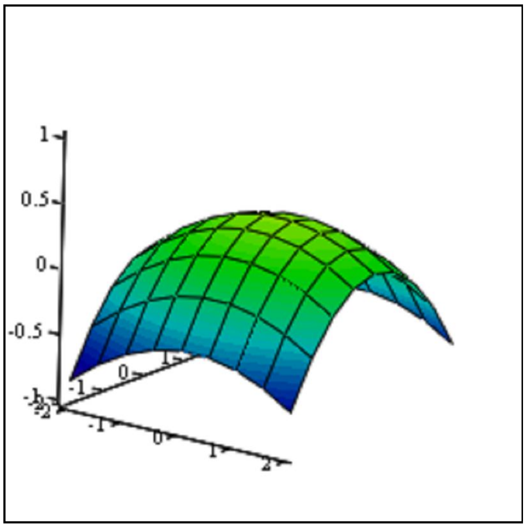
Вплив напруги на зварювальній дузі та швидкості зварювання на температуру та деформації конструкції є нелінійними. Поверхні відгуку (рис. 4.3–4.6) показують наявність екстремумів, найменших та найбільших значень функцій в області варіації параметрів. Доцільно для реальних технологічних процесів поставлені задачі розв'язувати графо-аналітичним методом або методами лінійного програмування з використанням поверхонь відгуків.

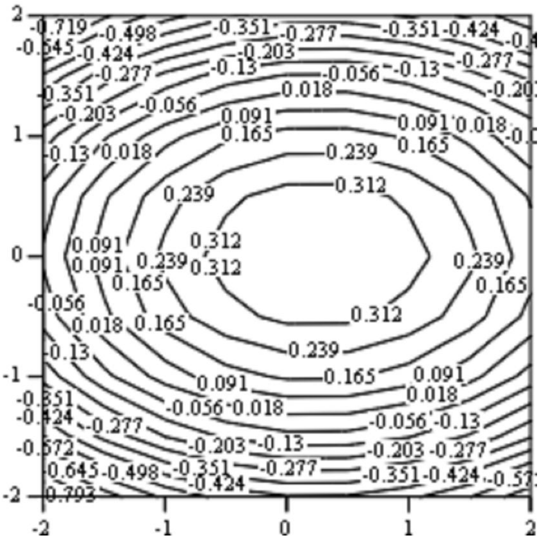
З аналізу поверхонь відгуків (рис. 4.13–4.18) випливає, що збільшення температури збільшує жолоблення конструкції.





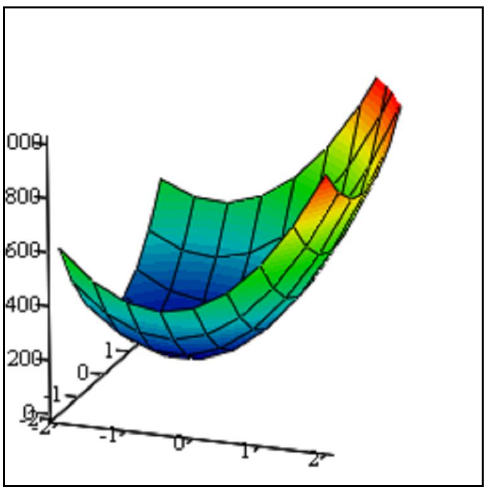
Y_a Y_a

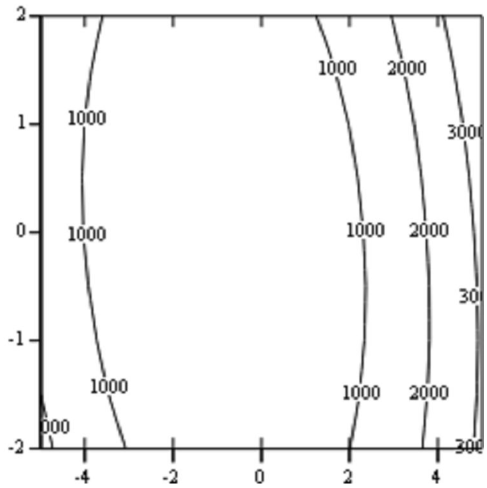




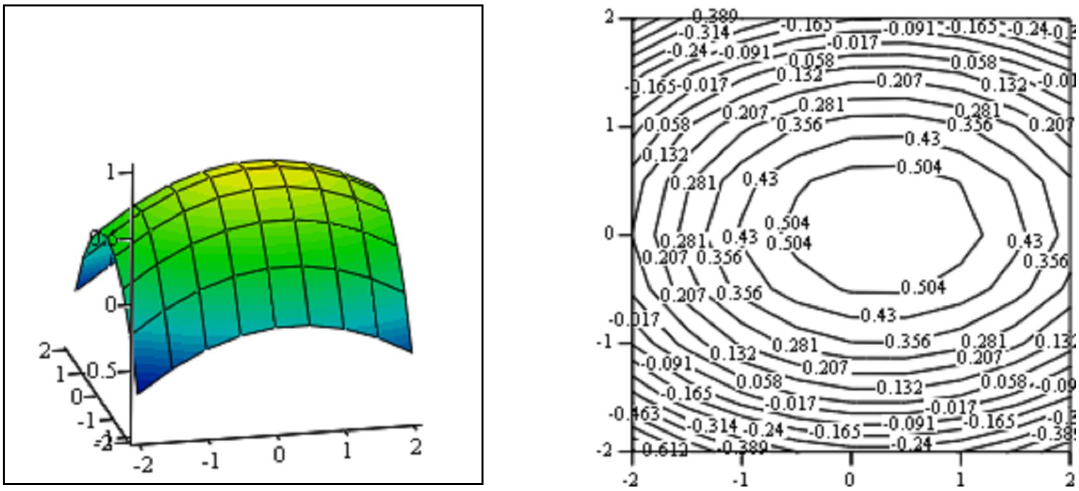
Y_z Y_z

Рисунок 4.13 – Поверхні відгуків функцій y(a) та y(z) при Umin



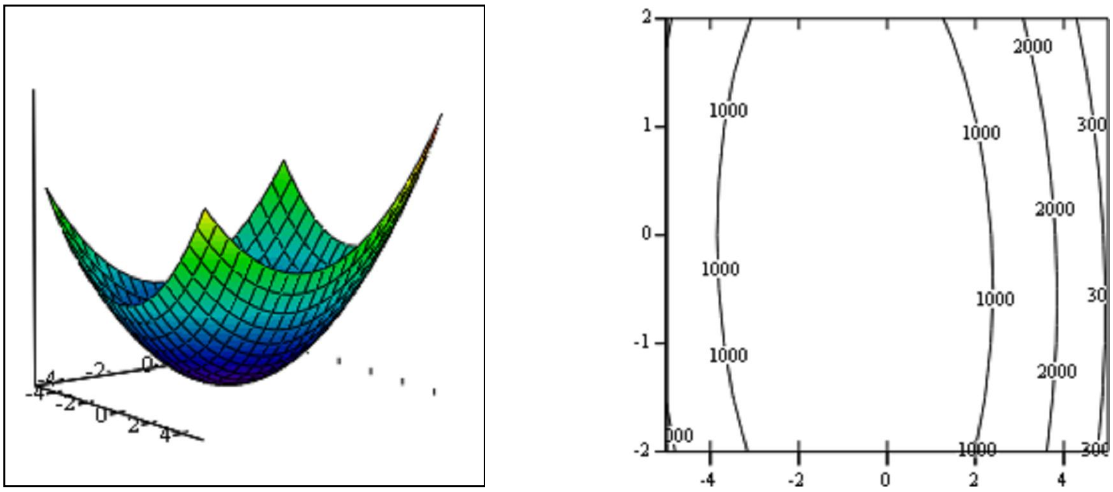


Y_a Y_a

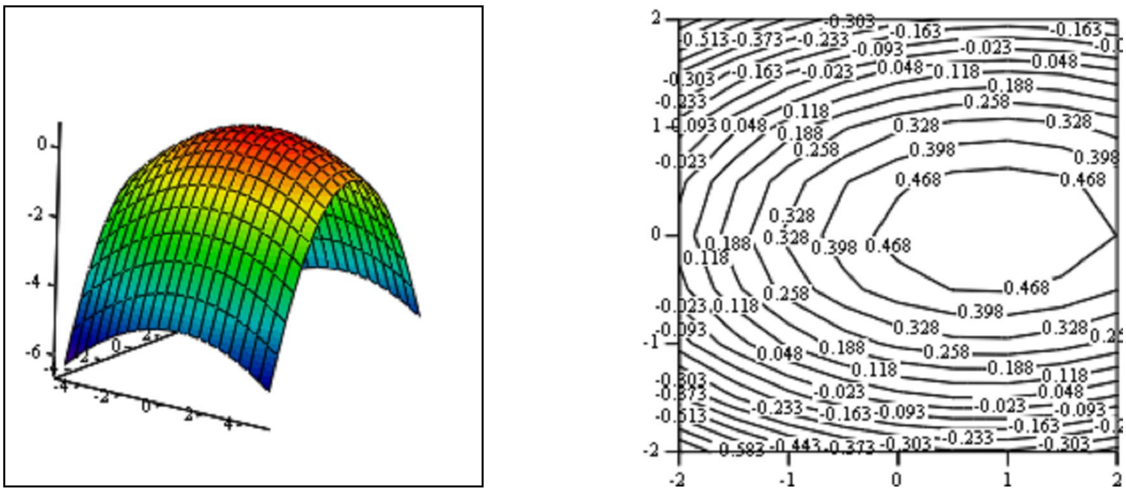


Y_z Y_z

Рисунок 4.14 – Поверхні відгуків функцій y(a) та y(z) при U_{max}

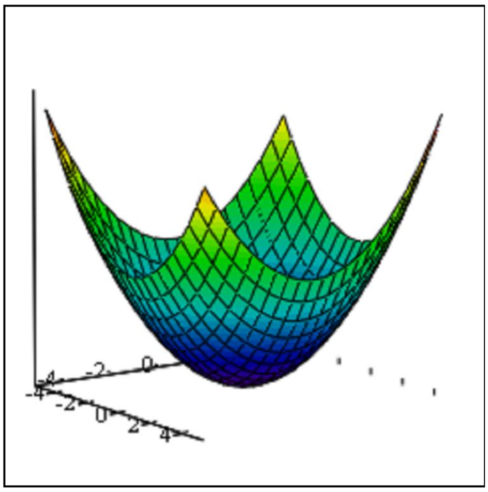


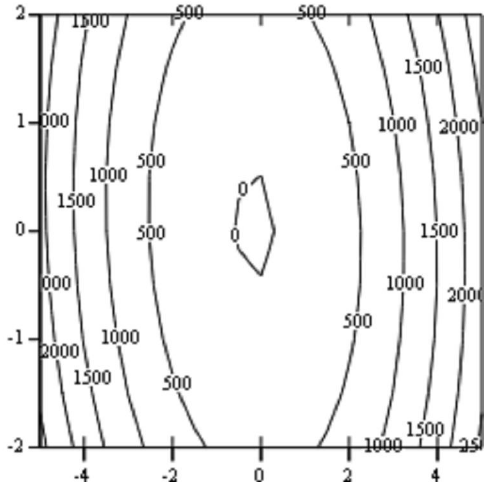
Y_a Y_a



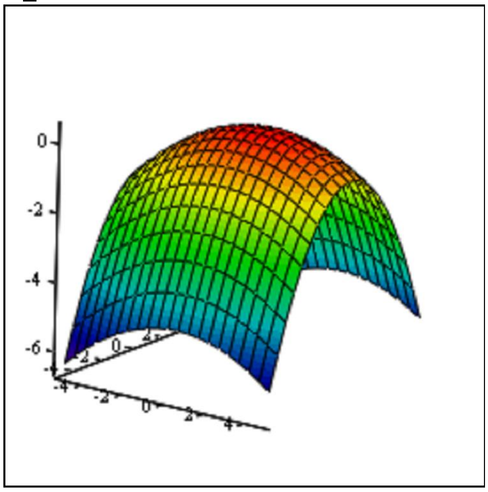
Y_z Y_z

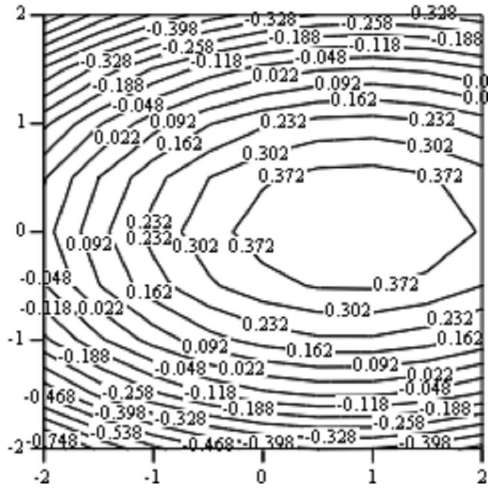
Рисунок 4.15 – Поверхні відгуків функцій y(a) та y(z) при V_{max}





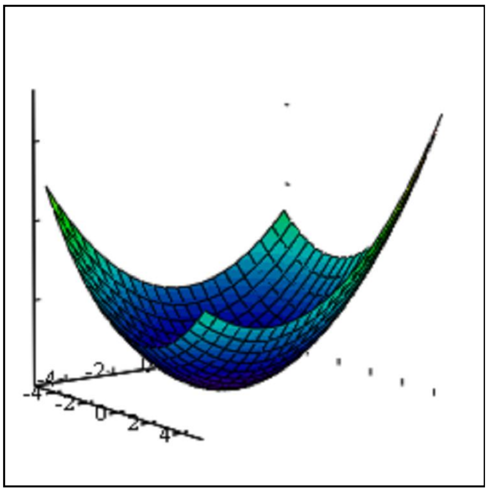
Y_a Y_a

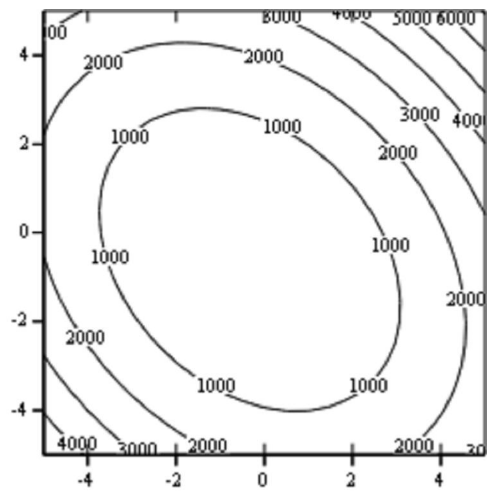




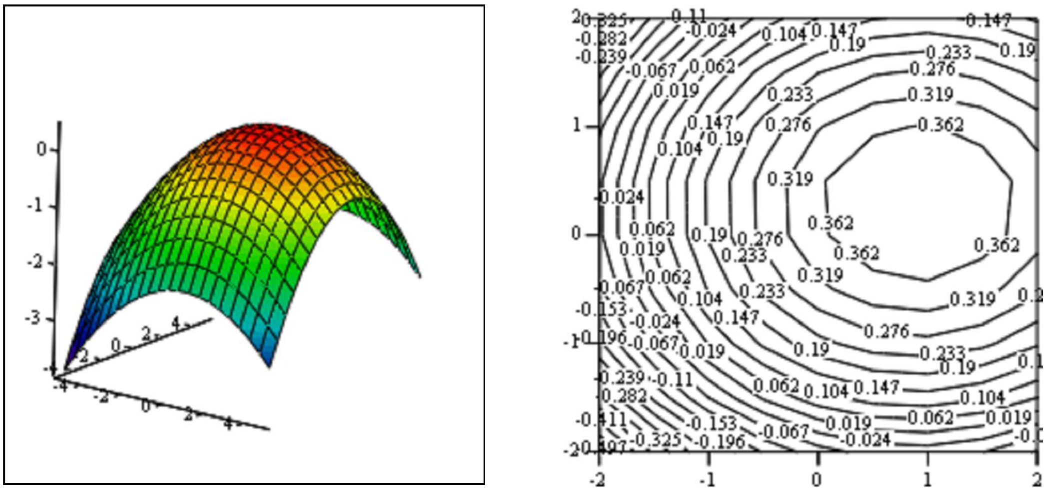
Y_z Y_z

Рисунок 4.16 – Поверхні відгуків функцій y(a) та y(z) при V_{min}



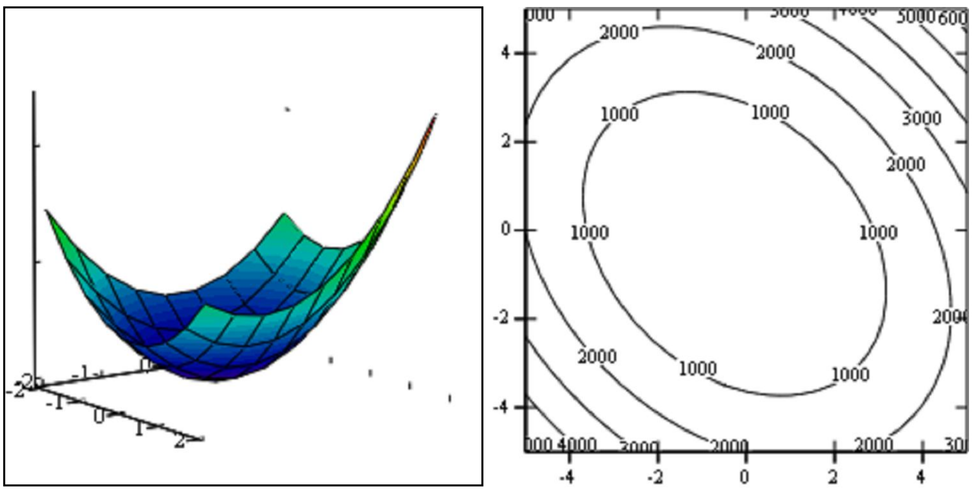


Y_a Y_a

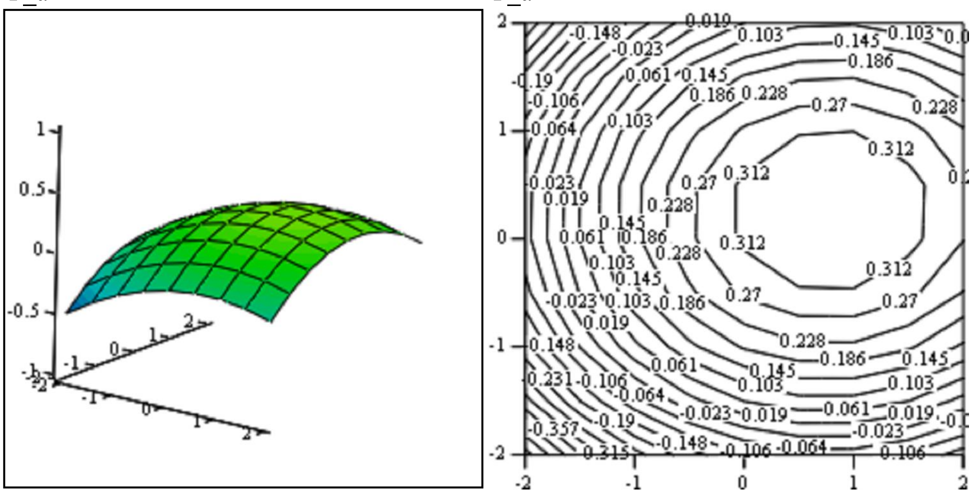


Y_z Y_z

Рисунок 4.17 – Поверхні відгуків функцій y(a) та y(z) при a_{max}



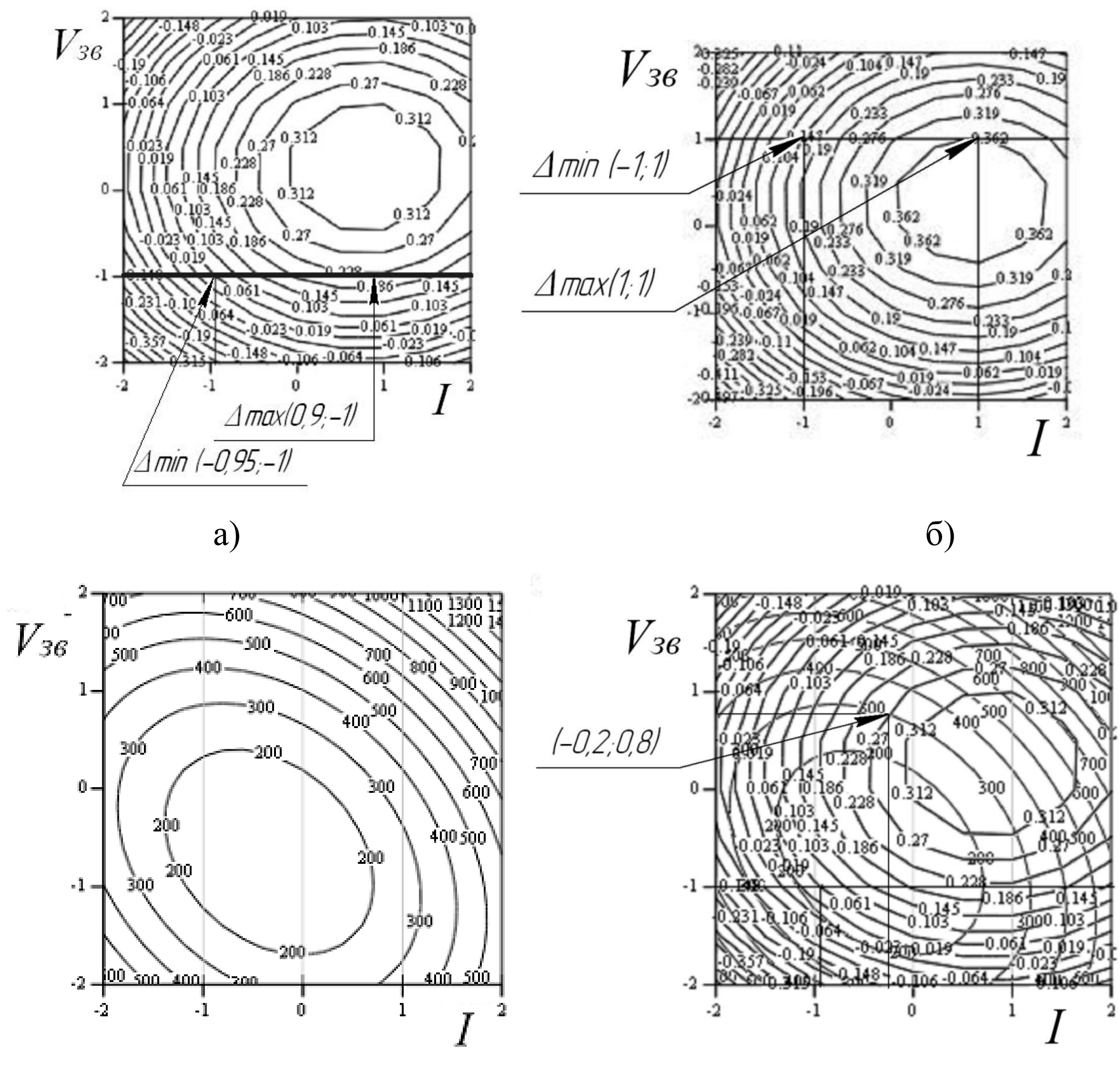
Y_a Y_a



Y_z Y_z

Рисунок 4.18 – Поверхні відгуків функцій y(a) та y(z) при a_{min}

За отриманими моделями (рівняннями регресії), при фіксованому значенні одного із параметрів процесу приварювання елементів підсилення, будують поверхні відгуків, що показують вплив інших значень параметрів на температурні поля та деформації, спричинені горінням зварювальної дуги. Наприклад, задаючи мінімальне та максимальне значення кута α (рис. 4.13–4.18) отримаємо поверхні відгуків, що характеризують вплив швидкості зварювання та сили струму на температури та деформації відповідно. Подібні задачі розв’язують графічним методом (рис. 4.19)



а) б) в) г)

Рисунок 4.19 – Графічний розв’язок задачі оптимізації режимів зварювання

Для визначення деформацій при фіксованому значенні кута α (вибрано 60˚) на графіку поверхні відгуку $y_{(\Delta)}$ (рис. 4.19 а), побудовано пряму швидкості зварювання, що відповідає координаті (-1), та отримано точки перетину з кривими деформацій. Мінімальними деформації будуть при силі струму, що відповідає координаті -0,95 по осі I, максимальними в області 1 і становитимуть 0,228 мм. На графіку (рис. 4.19 б) зображені поверхні відгуків для кута α 30˚, причому швидкість зварювання буде максимальною і пройде через координату 1 вісі V. Мінімальні та максимальні деформації становлять відповідно 0,147 і 0,362 мм.

Шляхом накладання кривих температур графіка $y_{(T)}$ (рис. 4.19 в) на поверхні відгуку $y_{(\Delta)}$ (рис. 4.19 а) отримаємо точки перетину поверхонь, що дозволяють визначити температуру та деформації для будь якої точки з області значень (рис. 4.19 г). Так, наприклад, для того щоб у точці з координатами (-0,2;0,8) отримати температуру 300 ˚С та деформації 0,27мм необхідно встановити такі режими: I =116 А , $V_{зв}$=11,36 м/год, α=60˚.

Використання таких методик дає змогу визначати необхідні режими зварювання. Таким чином, можна, зокрема, визначити режими, що забезпечують мінімальне значення деформацій. При цьому, необхідно враховувати взаємозв‘язок кута нахилу електрода зі швидкістю зварювання.

4.3. Оптимізація параметрів приварювання елементів підсилення

При зміні кута нахилу електрода змінюється розподіл теплової енергії по об’єму деталі та співвідношення між кількістю поглинутого та відбитого тепла. Дані характеристики впливають на форму, глибину і ширину шва при зварюванні та зміну величини напружень і деформацій в конструкції. Розробка рекомендацій щодо зміни положення електрода, при яких напруження і деформації в процесі зварювання будуть мінімальними і є основним завданням даного підрозділу.

В процесі зварювання положення електроду відносно деталі визначається кутом до осі шва β та кутом α в площині, перпендикулярній осі шва (рис.4.20).

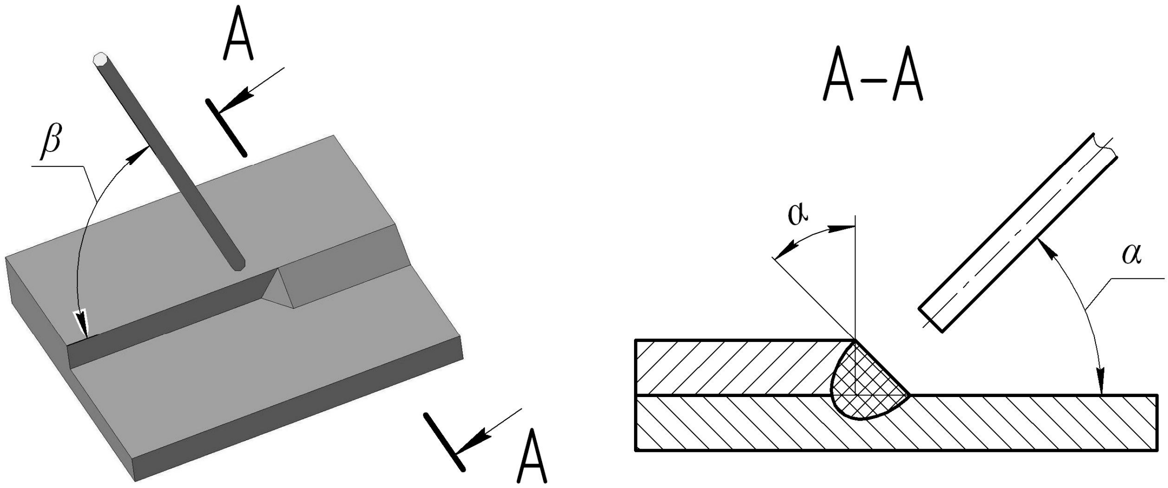


Рисунок 4.20 – Кути, що визначають положення електрода в просторі

Зміна кута α при зварюванні внапуск (рис.4.20) найбільше впливає на форму поперечного перерізу зварного шва (рис.4.21) і об’єм наплавленого металу, а тому визначає швидкість зварювання.

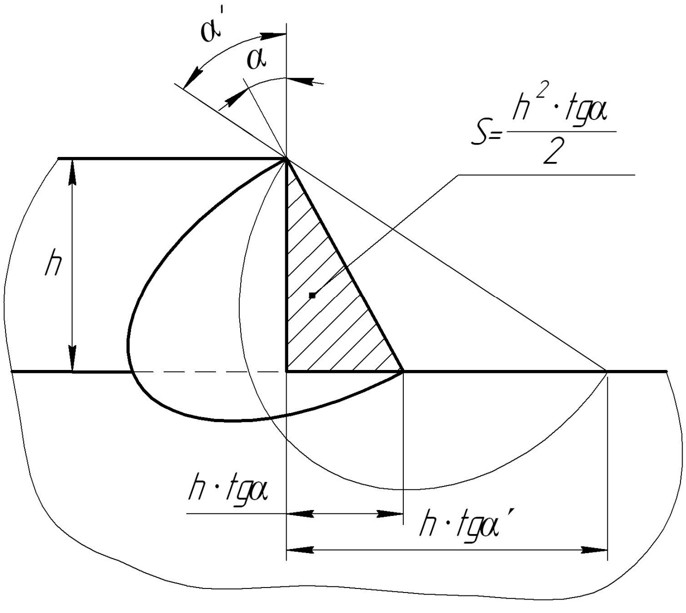


Рисунок 4.21 – Параметри поперечного перерізу зварного шва для приварювання накладок

Значення кута α за ГОСТ 5264-80 можуть коливатись в межах 30...60˚. Товщини ремонтних накладок в більшості випадків не перевищують 10 мм. В таблиці 4.5 наведено рекомендовані значення швидкості зварювання для різних товщин накладок та кута α.

Таблиця 4.5- Швидкість зварювання, м/год

Кут α˚	Товщина накладки h, м					
	0,003	0,004	0,005	0,006	0,008	0,010
	швидкість зварювання, м/год					
30˚	39,48	22,21	14,21	9,87	5,55	3,55
35˚	32,55	18,31	11,72	8,14	4,58	2,93
40˚	27,16	15,28	9,78	6,79	3,82	2,44
45˚	22,79	12,82	8,21	5,70	3,21	2,05
50˚	19,12	10,76	6,88	4,78	2,69	1,72
55˚	15,96	8,98	5,75	3,99	2,24	1,44
60˚	13,16	7,40	4,74	3,29	1,85	1,18

В одній із програм кінцевоелементного аналізу побудовано модель, яка дозволяє визначати напруження та деформації, що мають місце в процесі приварювання підсилювальних елементів в різних умовах. В даному випадку змінними були кут нахилу електроду і, відповідно, швидкість зварювання, товщина пластини становила 5 мм. При порівнянні отриманих даних з експериментальними похибка склала менше 5%, що свідчить про відповідність комп’ютерної моделі реальним умовам.

Розглядались дві найбільш поширені схеми приварювання елементів підсилення: до плоскої ділянки на рамі та до поверхні стінки профілю (в нашому випадку швелера).

Аналіз впливу кута нахилу електроду під час зварювання проводився за наступними критеріями: піками напружень та деформацій, які виникають в конструкції; сумарними деформаціями; закономірностями поширення деформацій. Вимірювання напружень та деформацій проводилось у трьох взаємноперпендикулярних напрямках (вертикальному *Z*, горизонтально-поздовжньому *X* та горизонтально-поперечному *Y* відносно деталі).

4.2.1 Вплив кута нахилу електрода при встановленні підсилювальної накладки на НДС плоского тіла.

На рисунку 4.22 показано приклад виникнення деформацій ділянки конструкції рами під впливом температури від процесу зварювання.

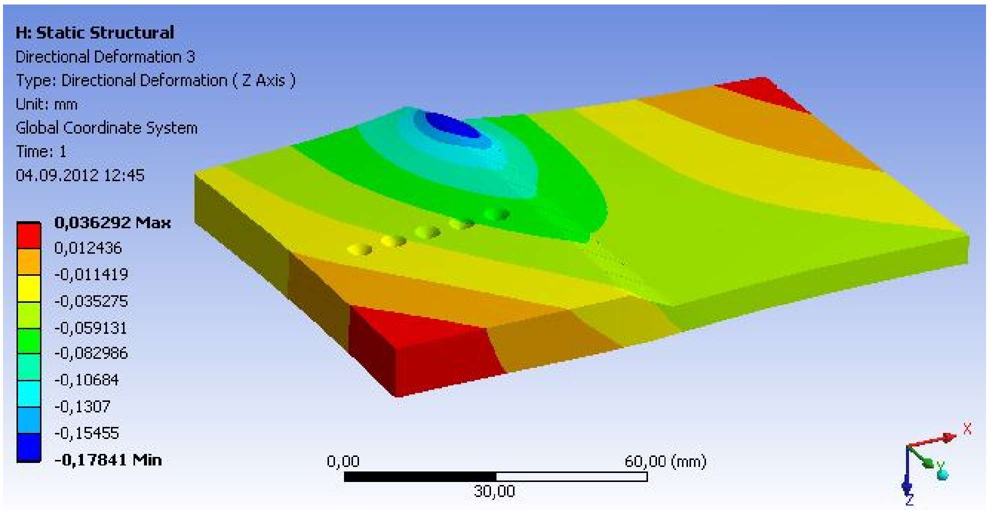
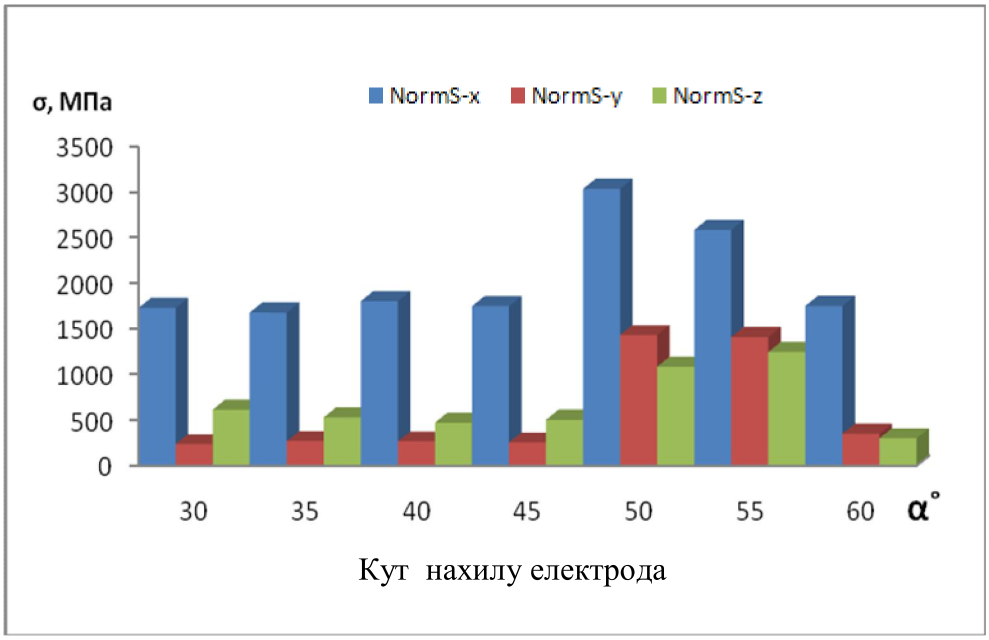
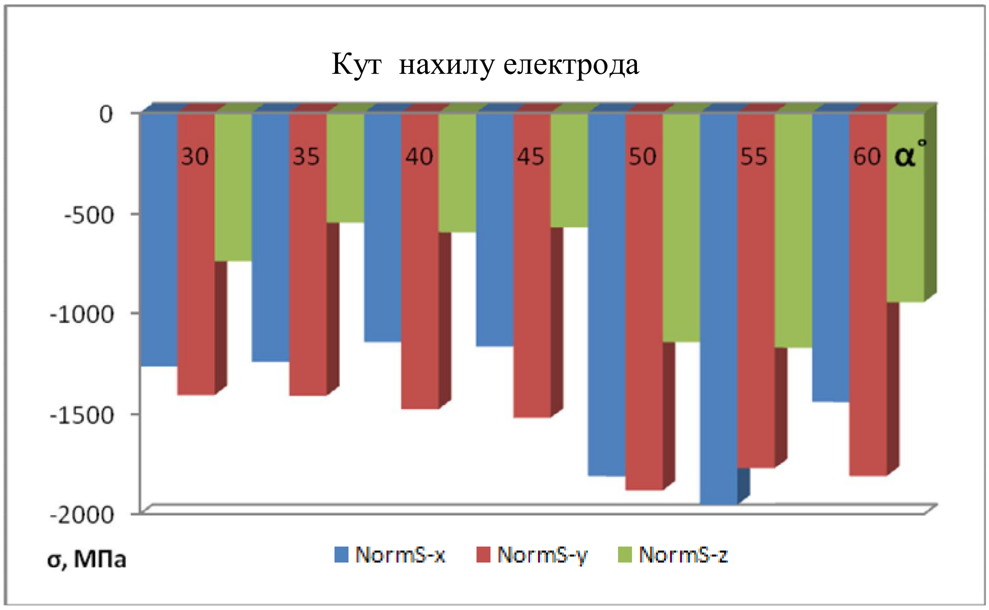


Рисунок 4.22 - Приклад виникнення деформацій ділянки конструкції рами

Під впливом нерівномірного розповсюдження тепла по об’єму деталі, з врахуванням особливостей геометричної будови конструкції, виникають різні за величиною та напрямком напруження σ, максимальні піки яких зображені на рисунку 4.23. Встановлено, що із збільшенням кута нахилу електроду α більше 45° під час приварювання підсилюючої накладки до плоскої ділянки на рамі, розтягувальні напруження, які, у переважній більшості, стають основною причиною утворення тріщин, у конструкції значно зростають (рис. 7а).



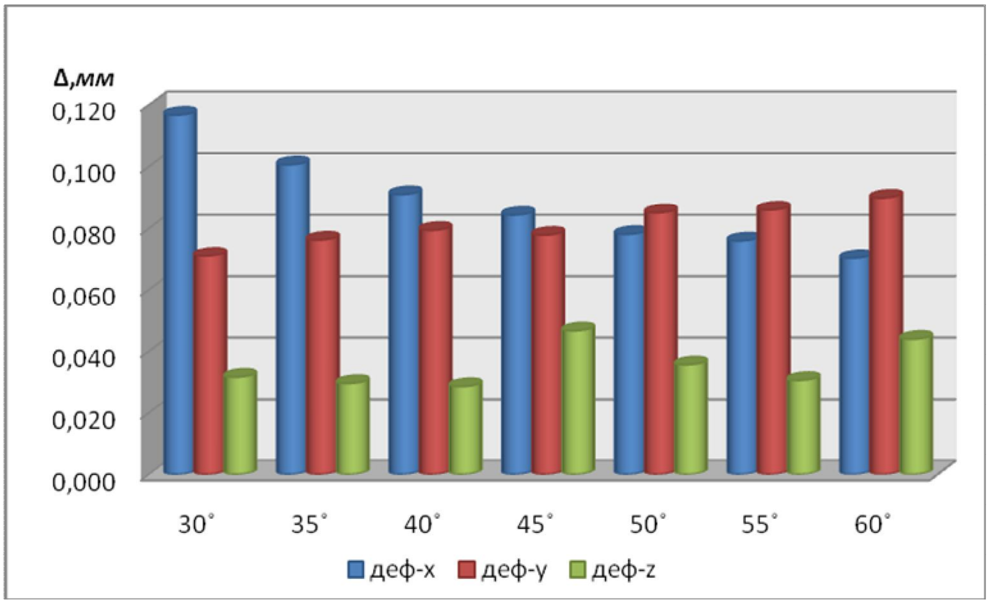
а)



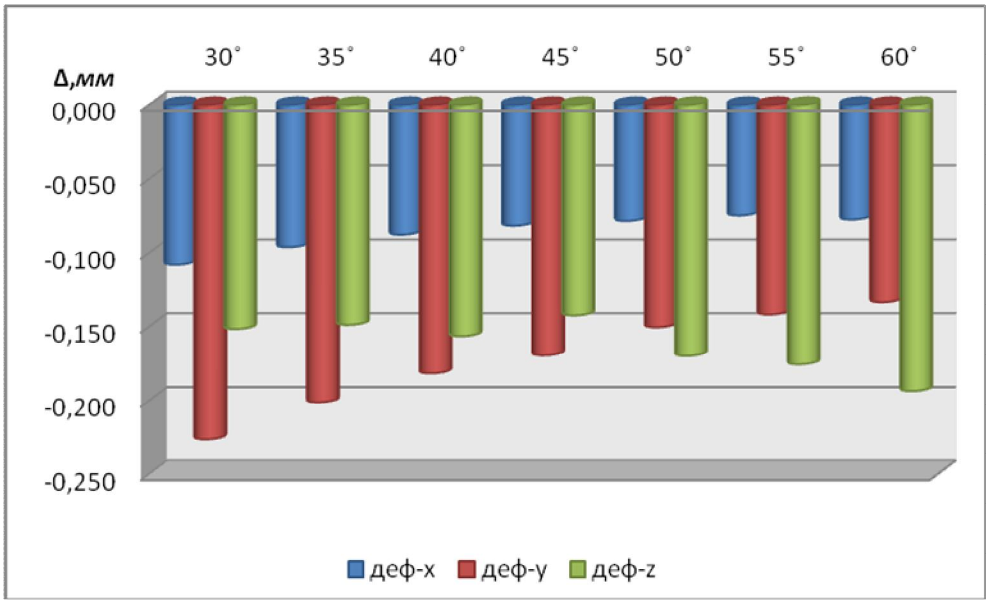
б)

Рисунок 4.23 – Еквівалентні максимуми поточних напружень по осях x, y, z: а) розтягу; б) стиску

У випадку виникнення внутрішніх напружень в матеріалі рами вище границі текучості вона починає пластично деформуватися. Зміна деформацій вздовж осей в залежності від кута нахилу електроду зображено на рисунку 4.24.



а)



б)

Рисунок 4.24 – Еквівалентні максимуми поточних деформацій вздовж осей x, y, z: а) – додатні; б) – від'ємні

Проаналізувавши графіки напружень та деформацій, бачимо, що для встановлення накладок на плоскі тіла кут нахилу електроду слід обирати в межах 45-50˚. Частково це підтверджується характером поширення деформацій по об'єму (рис 4.26) проте для забезпечення їх рівномірності кут нахилу потрібно зменшити до 40˚

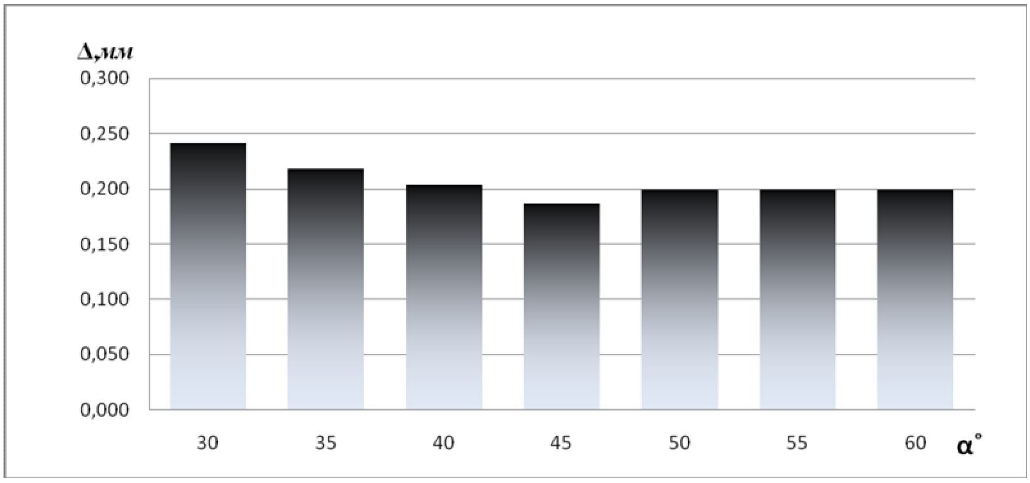


Рисунок 4.25 – Сумарні максимуми поточних деформацій

Із графіків деформацій, виміряних в точках на різних відстанях від зварного шва, (рис. 4.26) визначено, що для забезпечення відсутності жолоблення в зоні температурного впливу, доцільно проводити зварювання з кутом нахилу електроду 35˚–40˚.

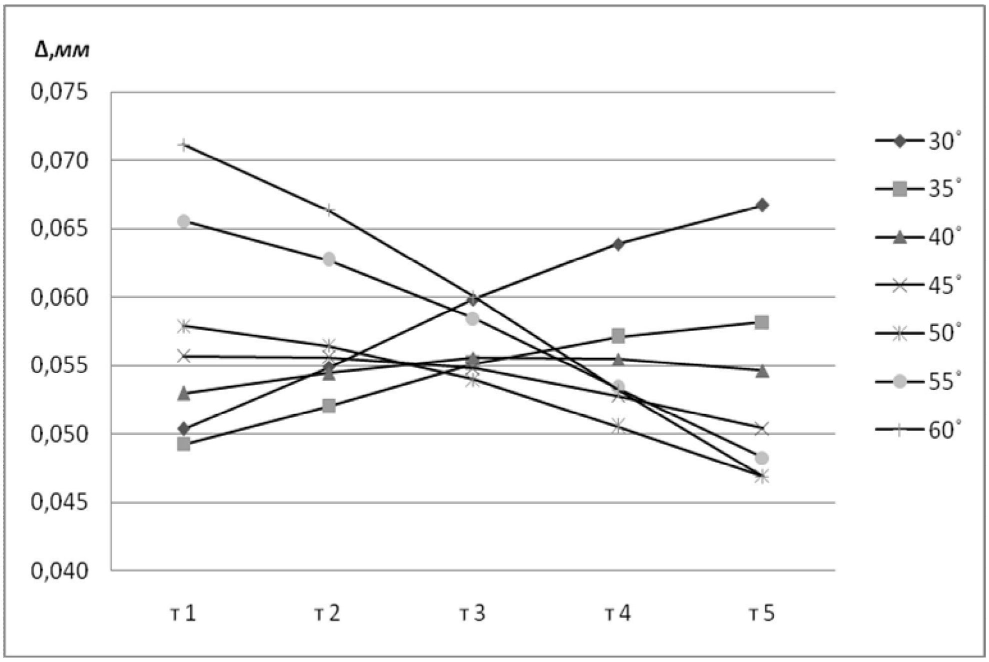


Рисунок 4.26 – Зміна значень деформації на різних відстанях від зварного шва

4.2.2. Вплив кута нахилу електрода при встановленні підсилюючої накладки на НДС профілю лонжерона рами (рис 4.27). У випадку приварювання елементів підсилення на поверхні просторових профільованих деталей, їх напружено-деформований стан суттєво відмінний від розглянутого вище, внаслідок збільшення їх жорсткості та конфігурації площ теплообміну.

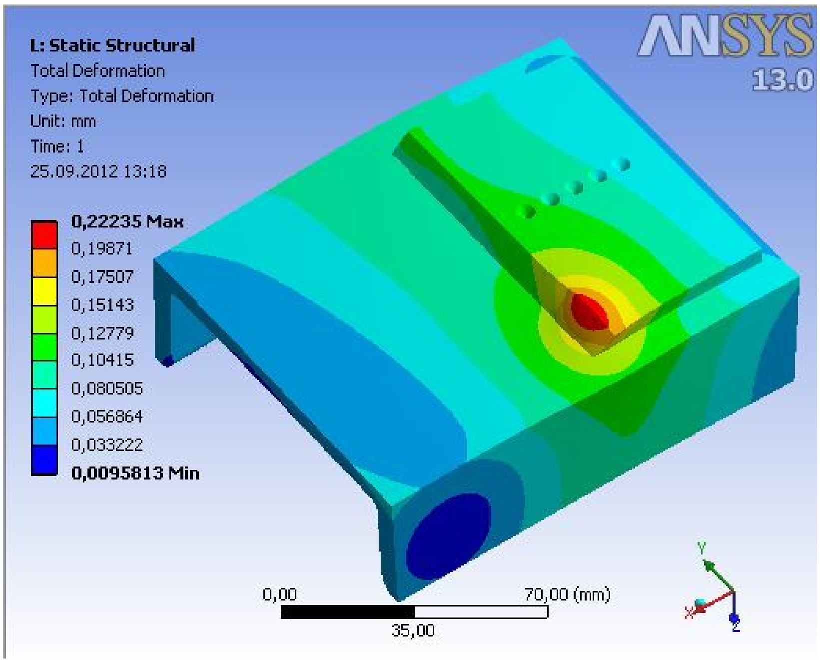
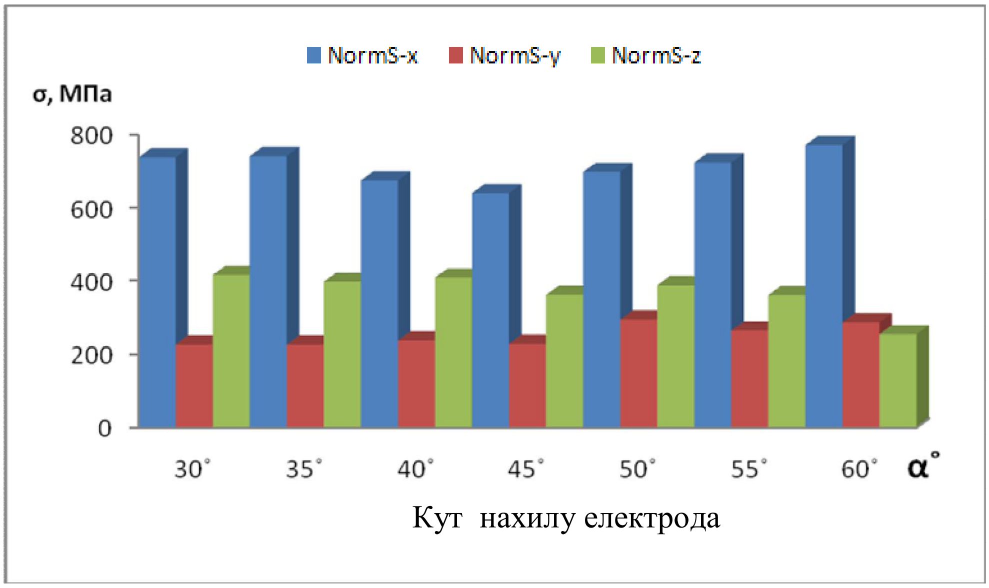


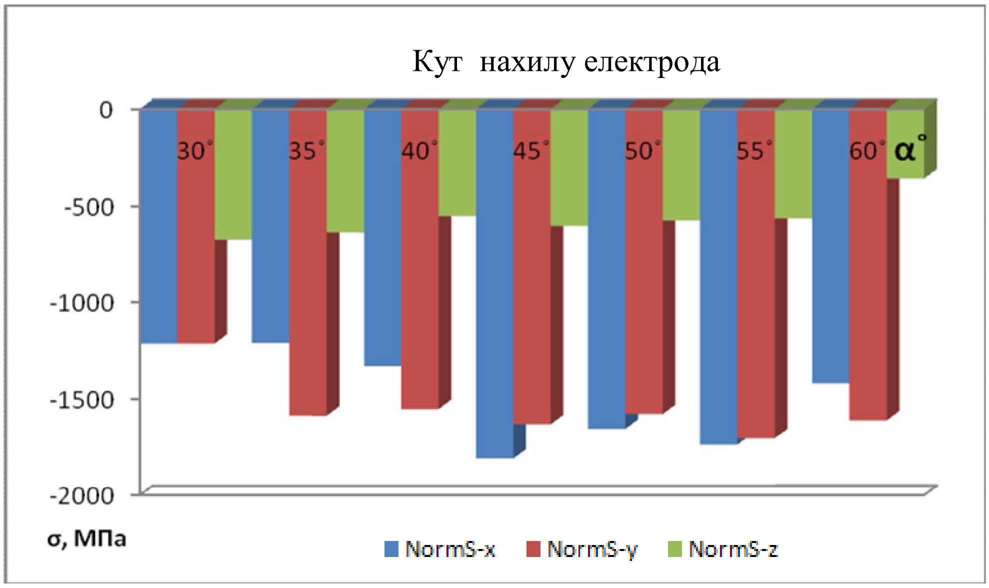
Рисунок 4.27 – Приклад кінцевоелементного аналізу рами з швелероподібним профілем лонжерона

У випадку приварювання елементів підсилення до поверхні профільованих ділянок рами, їх напружено-деформований стан суттєво змінюється за рахунок збільшення їх жорсткості та конфігурації площ теплообміну. У лонжеронах рам з профілем типу швелер переважно виникають стискаючі напруження, що зменшуються при направленні теплоти зварної дуги в метал елемента підсилення і, відповідно, зі збільшенням швидкості зварювання (рис. 4.28 б).

Напруження розтягу мінімальні, коли кут нахилу електроду становить 45˚ (рис. 4.28 а), тобто тепловий потік рівнорозподіляється в матеріал накладки і рами. Із зміною кута до граничних значень (30˚ або 60˚) напруження розтягу в рамі збільшуються.



а)



б)

Рисунок 4.28 – Еквівалентні максимуми поточних напружень по осях x, y, z: а) розтягу; б) стиску

За данними, наведеними на рисунках 4.28, розраховані еквівалентні максимуми поточних деформацій в навколошовній зоні під час приварювання накладки (рис. 4.29). Аналіз діаграми показує, що із збільшенням кута нахилу електрода α деформації зменшуються і після 45˚ стабілізуються.

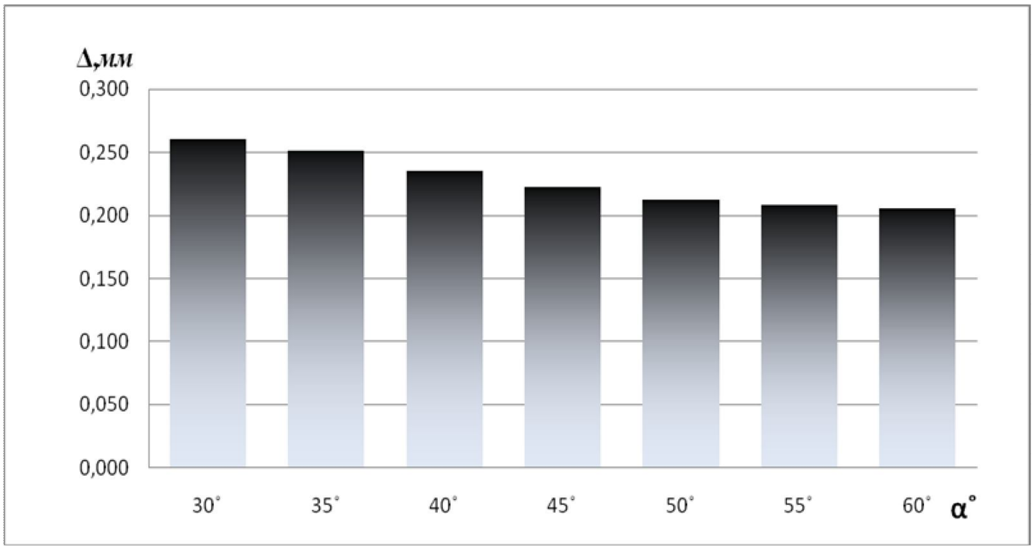
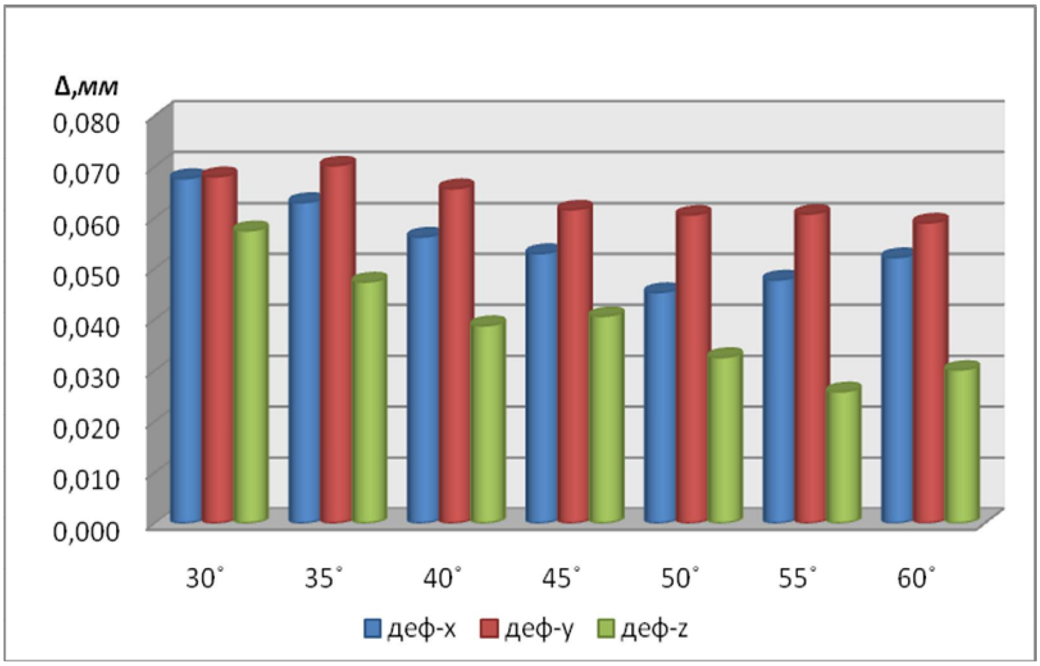
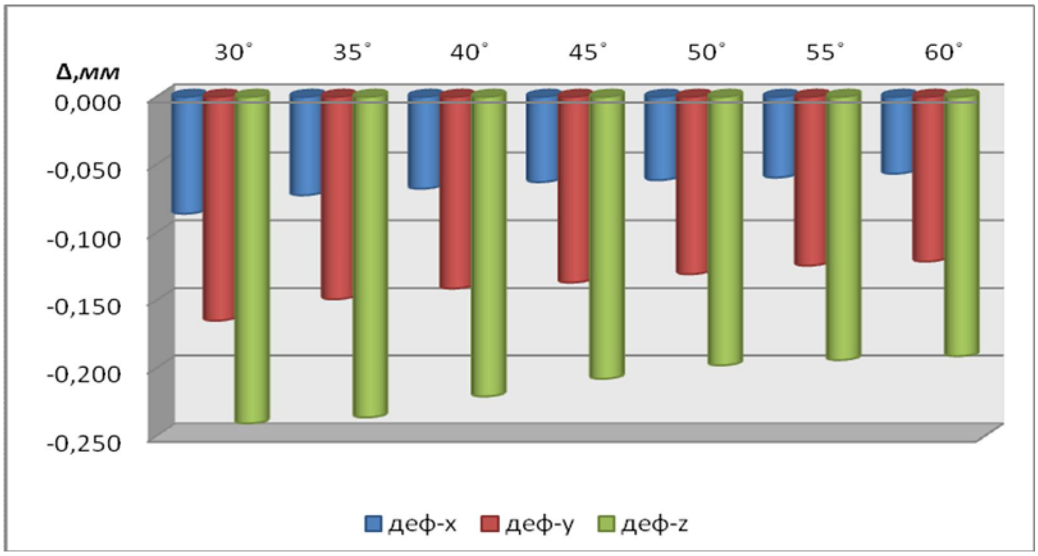


Рисунок 4.29 - Еквівалентні максимуми поточних деформацій в навколошовній зоні під час приварювання накладки

Із збільшенням кута нахилу електроду і напружень, що виникають в процесі приварювання елементів підсилення на профільовану поверхню поточні деформації знижуються (рис 4.30).



а)



б)

Рисунок 4.30 – Піки поточних деформацій по осях x, y, z:

а) – додатні; б) – від’ємні

Із графіків, побудованих за деформаціями, виміряними в точках на різних відстанях від зварного шва, на рамах типу швелер (рис. 4.31) видно, що із збільшенням відстані від зварного шва та кута нахилу електроду до 60˚ вони також зменшуються.

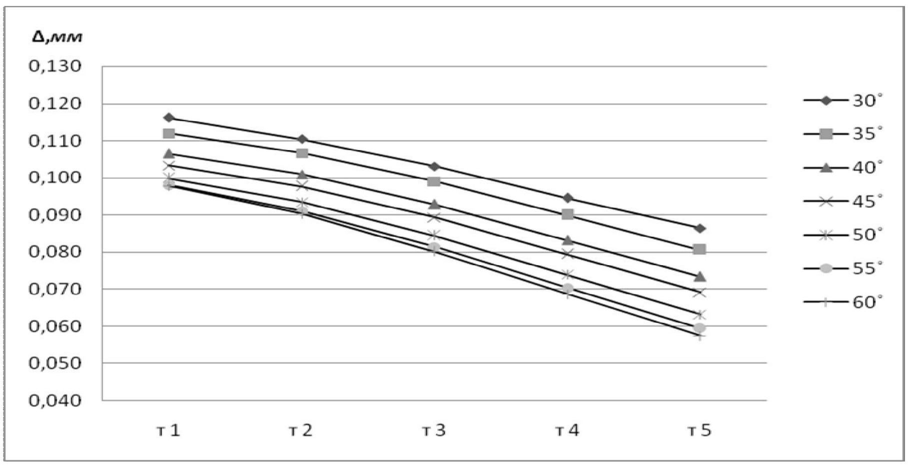


Рисунок 4.31 – Деформації лонжерона рами з швелероподібним профілем на різних відстанях від зварного шва

Тому, проводячи роботи на реальних конструкціях, перед початком вибору техніки зварювання, а саме встановлення кута нахилу електроду, необхідно враховувати як конструктивні особливості так і ряд факторів:

можливість і доцільність проведення заходів щодо зменшення напружень, вплив поточних деформацій на роботу конструкції. В деяких випадках вибором оптимальних параметрів зварювання можна забезпечити компенсацію експлуатаційних напружень розтягу на найбільш навантаженій полиці шляхом створення на ній напружень стиску.

Висновки до розділу 4

1. Визначення раціональних параметрів, що забезпечують мінімальні температурні впливи та деформації у процесі приварювання елементів підсилення внапуск, доцільно вести із використанням наведених рівнянь регресії. Проведені дослідження із використанням плану багатофакторного експерименту довели можливість зменшення деформацій, які спричиняють загрозу появи мікротріщин, шляхом зміни кута нахилу електрода у процесі зварювання.

2. Використання методики мінімізації деформацій, на етапах розробки технологічного процесу ремонтного зварювання з приварюванням накладок для підсилення, забезпечило їх зменшення у межах 10–12% та дозволило коректно розраховувати температурні поля для прогнозування фазових перетворень у зоні температурного впливу зварювальної дуги.

3. Встановлено суттєвий вплив просторового положення електрода під час приварювання елементів підсилення на НДС ділянок рами. Зі збільшенням кута нахилу електрода α більше 45˚ на плоских ділянках рами напруження у конструкції суттєво зростають, а деформації мінімальні і стабілізуються після кута нахилу електрода 45˚. У конструкції рами з лонжероном типу швеллер деформації зменшуються зі збільшенням кута нахилу електроду до 60˚.

4. Встановлено зменшення напружень і деформацій, які виникають під час приварювання елементів підсилення, шляхом застосування вдосконалених заокруглених контурів накладок. Використання накладок з округленнями 15-20мм дозволяє зменшити поточні деформації на 10%, а зварні напруження майже вдвічі.

РОЗДІЛ 5
ПОЄДНАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАННЯ ТА ПАЯННЯ ДЛЯ РЕМОНТУ І ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАМНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

5.1 Вплив заліковування тріщин мідними сплавами на міцність рамних конструкцій

Необхідно відзначити, що найбільш прогресивний напрямок збільшення довговічності та експлуатаційних властивостей деталей машин полягає в комбінуванні технологій зварювання та заліковування тріщин, які утворились в процесі експлуатації. Пропонується використовувати для цього супутніх до зварювання технологій. Це дозволяє найбільш повною мірою задовольнити сучасні запити практики.

Даний підрозділ присвячений вивченню та дослідженню можливостей реалізації процесу зміцнення пошкоджених рам шляхом заліковування тріщин заповненням їх розплавами міді та розробці методів поєднання зварювання з паянням припоями на основі міді.

Для проведення експериментальної частини досліджень виготовлено сталеві зразки (рис.5.1) з тріщинами та установку (рис. 5.2), яка дозволила реалізувати технологію запаювання тріщин сплавами на основі міді [122].

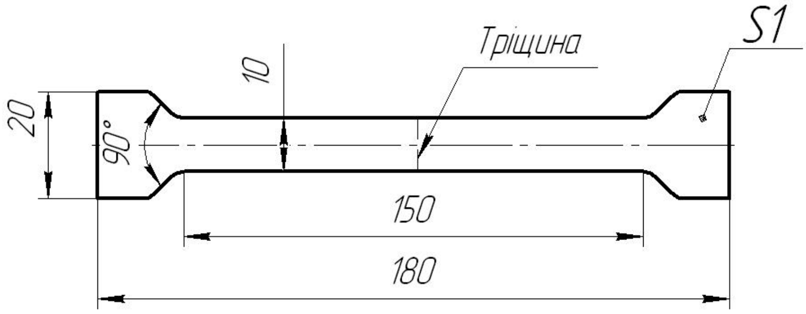


Рисунок 5.1 – Креслення дослідного зразка

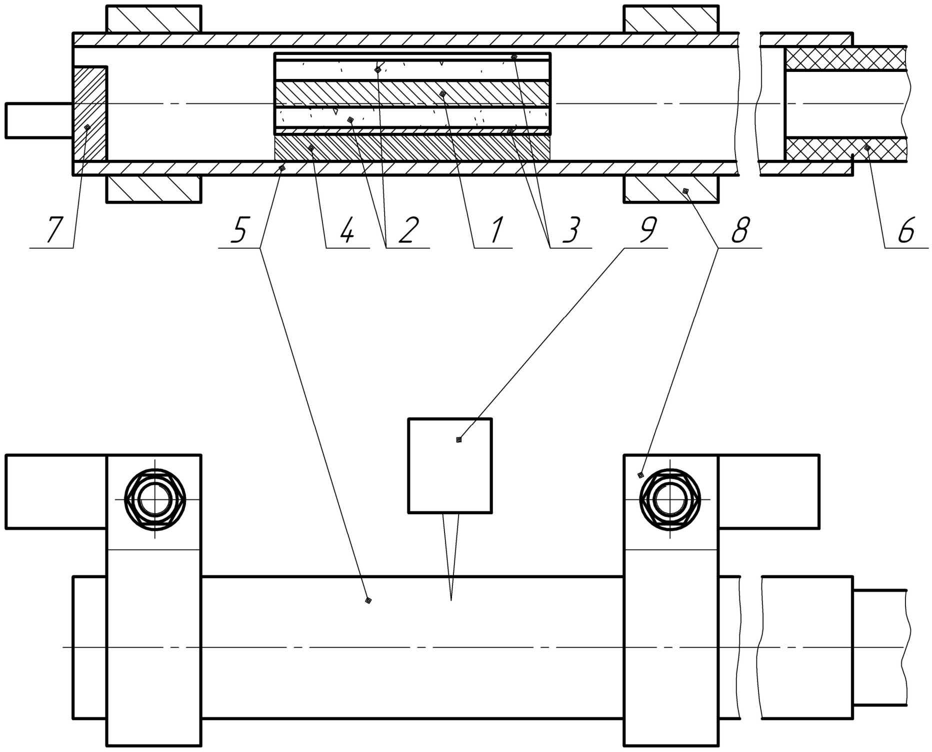


Рисунок 5.2 – Схема установки для відновлювального зміцнення:
1 – деталь, 2 – флюс 3 – мідний лист, 4 – підставка, 5 – камера нагрівання,
6 – трубка для підведення захисного газу, 7 –заглушка, 8 – затискач,
9 –термопара

Деталі з тріщинами 1 запаковували в мідний лист 3 і розміщували на керамічній підкладці 4 у камері 5, нагрівання якої проводилось постійним струмом через затискачі 8. Пропускання аргону через камеру нагрівання 5 проводилось через трубку для підведення захисного газу 6 та отвір у заглушці 7. Температура нагрівання камери вимірювалась термопарами та фіксувалась.

Для усунення негативного впливу розбіжності у температурах плавлення, різниці в теплопровідності і теплоємності між залізом та міддю, високої спорідненості міді до кисню, її високої рідкотекучості, схильності до пористості та появи крихкої евтектики Cu + Cu_2O, процес відновлювального зміцнення проводився в захисному середовищі аргону. Обробка тривала 1 годину при плавному збільшенні температури до 1200°C. Після відновлювального зміцнення проводились випробування зразків на розрив.

Фізико-хімічні властивості Cu та Fe близькі (будова кристалічної решітки, атомні радіуси і т. д.), що дає можливість отримання сполук міді (мідних сплавів) з залізом (сталлю) [86]. При кімнатній температурі залізо з міддю утворює тверді розчини заліза в міді (ε-фаза, вміст Fe $\leq$ 0,2%), міді в α-залізі (0,3% Cu) і суміші цих розчинів (α + ε). Розчинність міді в α-залізі менша, ніж у γ-залізі. При 20 °С за рівноважних умов у α-залізі розчиняється менше 0,3% Cu. При 850 °С максимальна розчинність міді в δ-, γ- і α-залізі становить відповідно 6,5, 8 і 1,4%. Розчинність заліза в міді зменшується зі зниженням температури з 4% при 1094 °С до 0,4% при 750 °С, а при 650 °С падає до 0,2% і з подальшим зниженням температури змінюється незначно.

Процес контактування сталі з рідкою міддю (мідними сплавами) супроводжується міжкристалітним проникнення міді в сталь (МКП). Механізм МКП пояснюється на основі уявлень про адсорбційне зниження міцності, міжзернову корозію і дифузію під впливом поля напружень, розклинювальну дію рідкої міді [93]. На рисунку 5.3 показано заповнені мідним сплавом тріщини у вигляді «клинів», що мали місце на дефектній поверхні відновлюваної деталі. Глибина залікованих тріщин сягає кількох міліметрів.

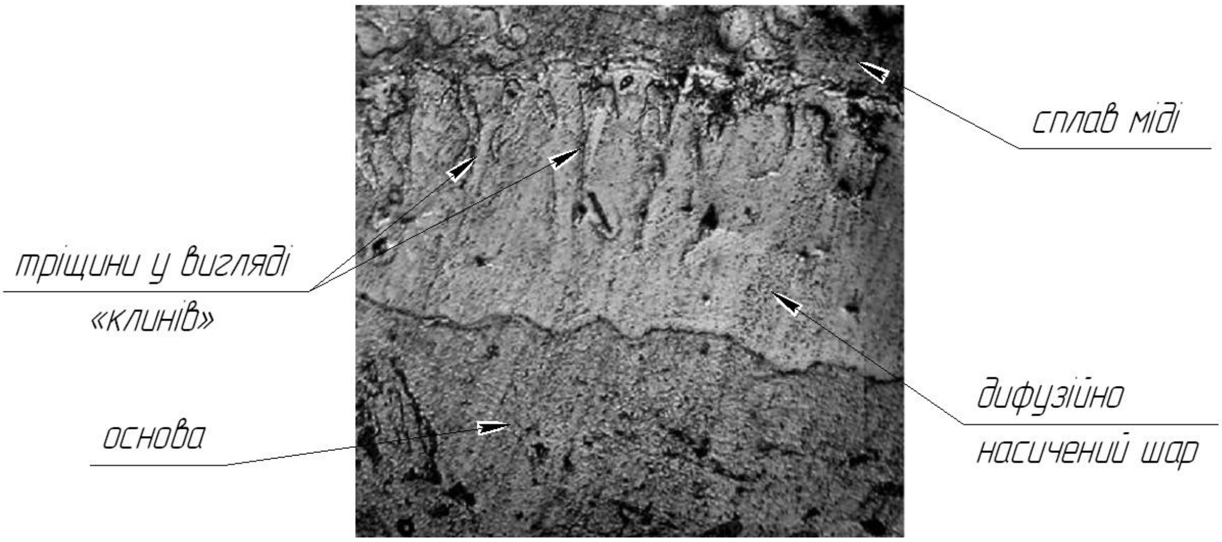


Рисунок 5.3 – Міжкристалітне проникнення міді в сталь

Вважається, що це істотно знижує механічні властивості сталі ($\sigma_{0,2}$, $\sigma_в$, σ_{-1}, δ) і, особливо, пластичні. Для перевірки запасу міцності зони з тріщиною нами проведено випробування на розривну міцність зразків з тріщинами після заліковування тріщин мідними сплавами. Виявлено, що руйнування зразків, що піддавались обробці, відбувалось поза зоною зміцнення (рис. 5.4).

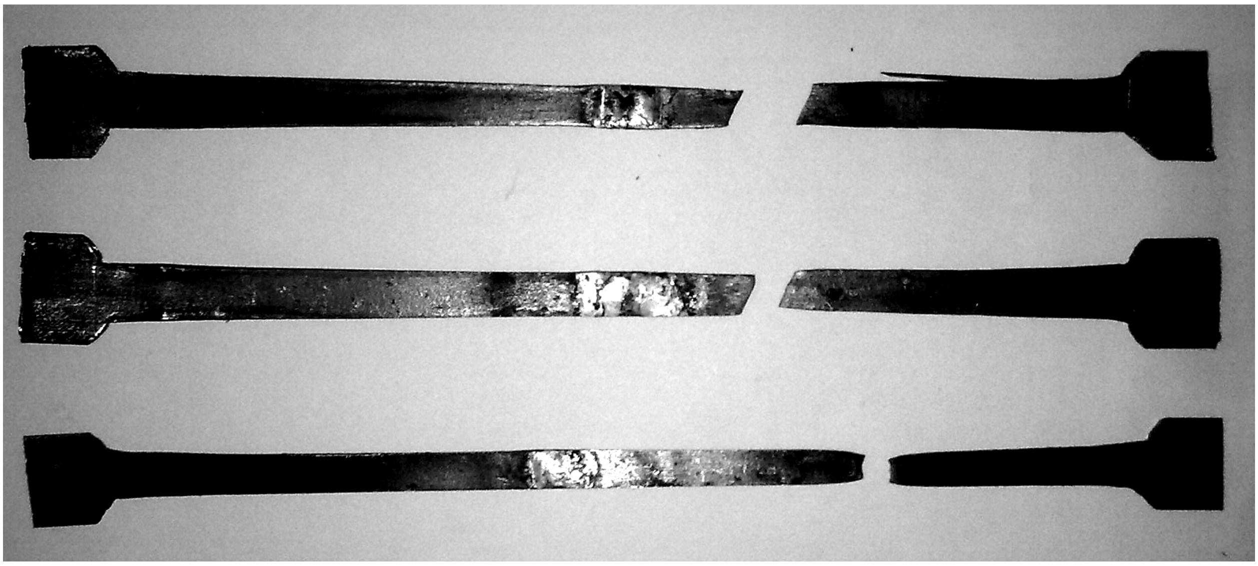


Рисунок 5.4 – Зразки після випробування на розрив

У технічно чистому залізі аустеніт існує в інтервалі температур 910–1401° С; а у вуглецевих сталях – при температурах не нижче 723°С. У легованих сталях аустеніт може існувати і при набагато нижчих температурах.

В сталях, що містять інші метали (крім заліза, леговані сталі), атоми металів заміщають атоми заліза в кристалічній решітці і виникає твердий розчин заміщення. Для вуглецевих сталей, що використовувались в експерименті, легувальні елементи пропонується вводити у вигляді порошку, що додається до флюсу.

Нікель, наприклад, стабілізує аустенітну фазу. Присутність нікелю у кількості 8–10% призводить до того, що аустенітна фаза зберігається і при кімнатній температурі.

Присутність хрому та нікелю при плавленні міді у контакті зі сталлю або при зварюванні сплавів на мідній основі у зоні сплавлення спричиняє утворення прошарків кристалізаційного і дифузійного характеру.

При переході в зону сплавлення значної кількості хрому утворюються, так звані, дендритні кристалізаційні прошарки. Чим більше дендритних включень перейшло на границю сплаву, тим більш висока його міцність і тим менша пластичність дифузійного шару. Розглядаючи фазову будову кристалізаційних прошарків можна сказати, що вони представляють собою пересичений твердий розчин α-заліза. Причому, дендрити заліза мають вигляд витягнутих кристалів, розташованих перпендикулярно напрямку тепловідведення при зміцненні.

Регулювання складу та кількості легувальних елементів у флюсі дозволяє керувати механічними властивостями поверхневих шарів. Так границя сплавлення між сталлю і міддю з включенням фази, збагаченої хромом та міддю, в залежності від часу обробки, може сягати 200 мкм (рис. 5.5), і змінювати форму від ідеально рівної до помітно хвилястої (рис. 5,6). Причому, кількість міді в складі γ-фази складає 7% мас. З боку сталі, що примикає до межі, розмір зерна збільшується в межах зони з шириною 1...2,5 мм. Мікротвердість зони сплавлення досягає 580...620 кгс/мм^2. Крім того, відомо [101], що в системах з таким вмістом міді спостерігається підвищення ступеня гетерогенності за рахунок утворення додаткової фази на основі міді (ε-бронзи).

Погіршує взаємну розчинність заліза і міді наявність у сталі вуглецю, а покращує марганець і кремній. Марганець знижує критичну точку A_3 і розширює область α-твердого розчину, в якому мідь розчиняється в значно більшій кількості, а кремній розкислює зварювальну ванну і зміцнює зерна твердого розчину.

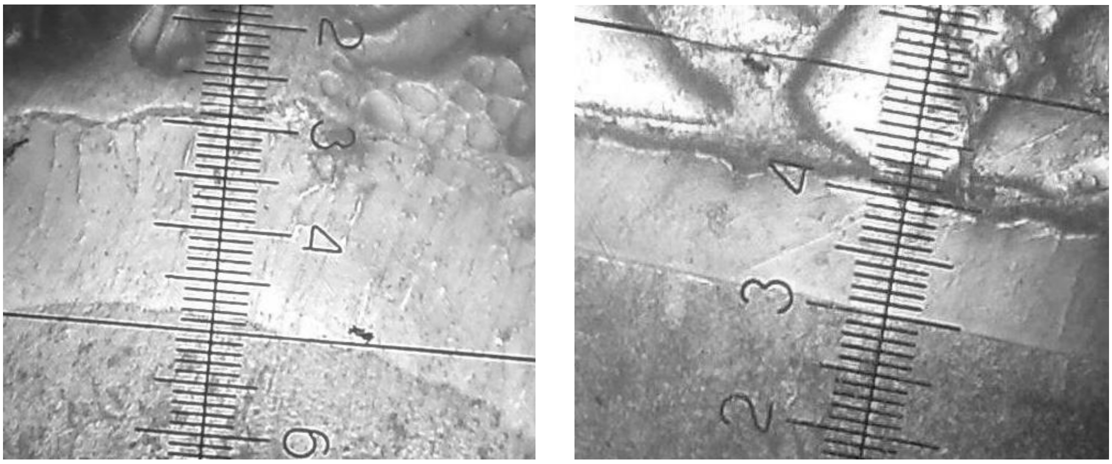


Рисунок 5.5 – Розміри границі сплавлення між сталлю і міддю

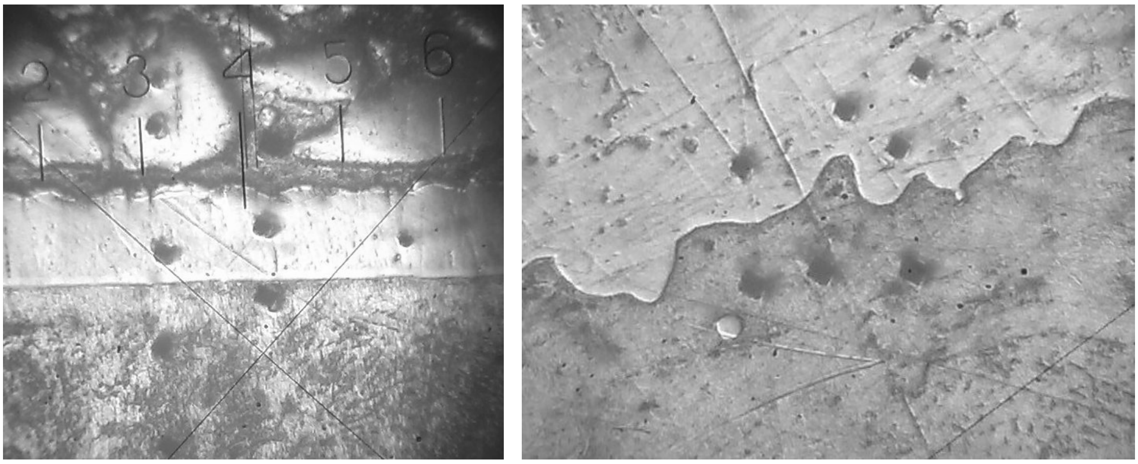


Рисунок 5.6 – Мікроструктура границі сплавлення

Аналізуючи вплив поверхневого дифузійного легування з одночасним запаюванням втомних тріщин на довговічність, було встановлено, що основна дія поверхневого зміцнення полягає в затримці розвитку тріщин.

5.2 Комбінованні технології ремонту тріщин рамних конструкцій

Необхідно відзначити, що найбільш прогресивний напрямок збільшення довговічності та експлуатаційних властивостей рам автомобілів полягає в комбінуванні технологій ремонту тріщин, які утворились в процесі експлуатації, методами зварювання з різними процесами зміцнювальних технологій. Це дозволяє повною мірою задовольнити сучасні запити виробництва.

Підсилення та ремонт зон рам з зародженими тріщинами можливе шляхом встановлення (приварювання) додаткових елементів. Така технологічна схема ремонту забезпечує необхідні характеристики міцності, але її недоліком є ослаблення металу в зоні температурного впливу та зменшенням у цій зоні корозійної стійкості. Дані недоліки можна усунути шляхом використання технології, яка поєднує процеси зварювання та паяння. Технологія передбачає використання припоїв з необхідною температурою плавлення для підвищення міцності зварних з’єднань внапуск, а також підвищення корозійної стійкості навколошовної зони. Особливістю є те, що припій встановлюється між основними елементами, які зварюються, та розплавляється за рахунок тепла, що виділяється в процесі зварювання [123] (рис. 5.7).

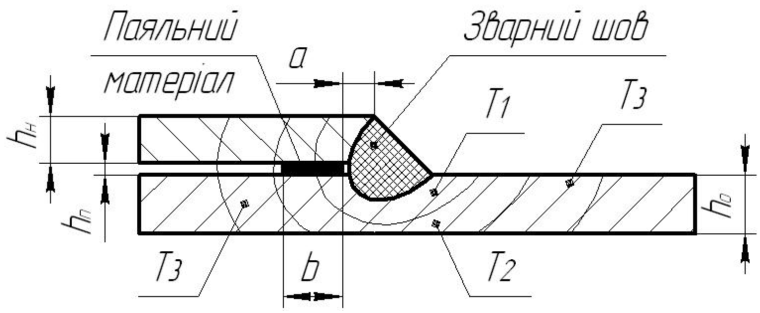
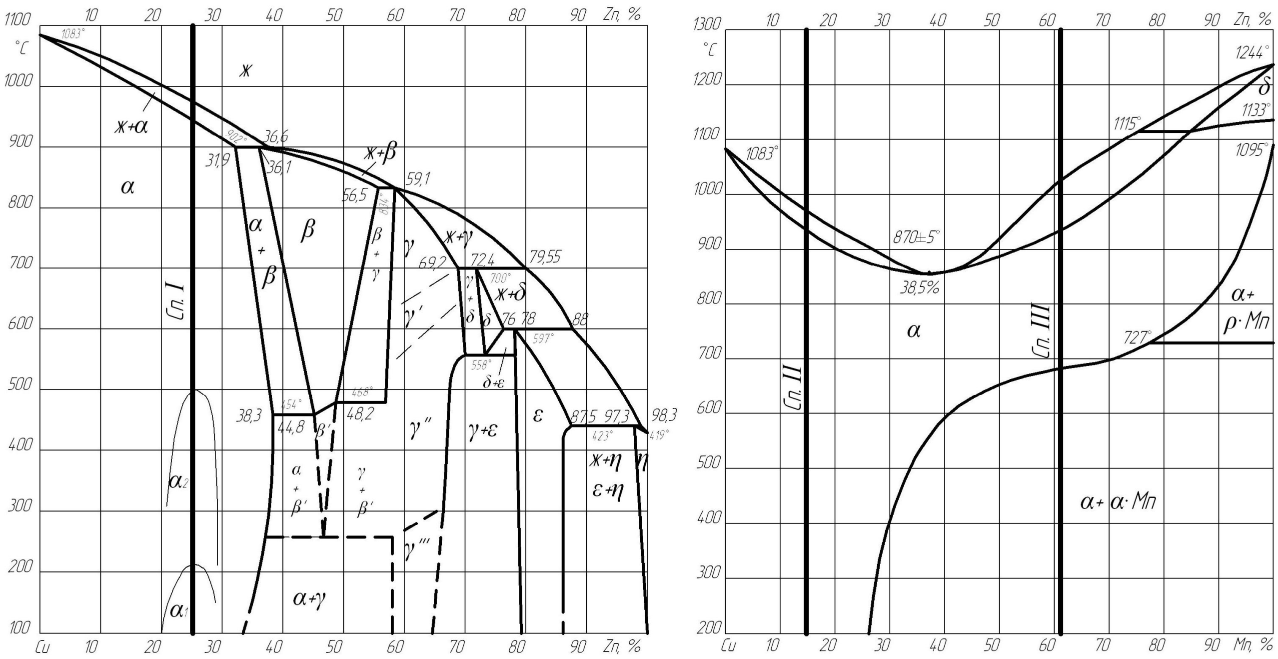


Рисунок 5.7 – Спосіб зварювання внапуск

Дослідженнями [124, 125] встановлено, що відновлення та зміцнення сталевих конструкцій шляхом заліковування пошкоджень сплавами на основі міді забезпечує гальмування тріщин, помітно збільшує їх живучість.

В якості припоїв для проведення експериментів нами використано мідь ГОСТ 859–66 та сплави міді з цинком, марганцем та іншими елементами. Мідь у чистому вигляді в розплавленому стані характеризується високою рідкотекучістю, добре змочує поверхню сталей, твердих сплавів, нікелю та нікелевих сплавів; затікає в найтонші капілярні зазори і дає міцні та пластичні паяні з'єднання.

Мідно-цинкові припої є подвійними сплавами міді та цинку в різних співвідношеннях. Діаграма стану сплавів системи мідь – цинк наведена на рис. 5.8. Найбільш цікавими є сплави, що містять менше 34% Zn і мають однофазну структуру α-твердого розчину. Зі збільшенням вмісту цинку пластичність припоїв знижується, викликаючи окрихчування паяних з'єднань.



а) б)

Рисунок 5.8 – Діаграма стану сплавів системи:

а) мідь – цинк; б) мідь – марганець

Поряд з добрими технологічними властивостями як припою, мідно-цинкові сплави мають високу корозійну стійкість [126]. Припої, що мають структуру *a*-твердого розчину, зберігають достатню міцність навіть в умовах низьких температур. Недоліком цих припоїв є випаровування цинку від високих температур, що погіршує умови роботи з ними.

Припої на основі сплавів міді з марганцем мають порівняно низьку температуру плавлення, достатньо високу міцність і пластичність. Припої цієї системи не набули поширення, але вони дуже перспективні, так як паяні ними конструкції мають більш високу міцність на температурах 500 – 600 °С в порівнянні зі з'єднаннями, які запаяні мідно-цинковими припоями.

На кафедрі технології підвищення зносостійкості ВНТУ розроблено спосіб зварювання внапуск, який передбачає розміщення паяльного матеріалу на основі міді між деталями, що зварюються, в зоні температурного поля, де забезпечується його розплавлення (див. рис.5.7). На спосіб отримано патент на корисну модель [123].

Необхідною умовою реалізації описаного вище способу є обґрунтований вибір чи розрахунок параметрів процесу зварювання-паяння, при яких відбудеться повне розплавлення припою і утворюватиметься якісне з'єднання деталей.

Для цього необхідно визначити: режими зварювання, враховуючи товщину профілю рами в зоні приварювання h_o та накладки $h_н$; склад паяльного матеріалу; товщину $h_п$ та ширину b смужки припою; її віддаль від зварного шва *а,* в залежності від глибини проплавлення та геометрії шва в поперечному перетині. Допустимий зазор між деталями регламентується ГОСТ 5264–80 та залежить від товщини деталей і може становити до 2 мм, чого достатньо для встановлення паяльного матеріалу.

Визначення оптимальних режимів комбінованого зварювання доцільно проводити методом моделювання процесу із використанням спеціалізованого програмного забезпечення на основі кінцево-елементного аналізу. Розроблено модель, яка дозволила аналізувати в часі теплові поля в процесі зварювання та охолодження деталі, а саме визначати зміни температур в різних точках об'єму матеріалу деталі та припою.

Перевірка адекватності та настроювання моделі виконувались шляхом проведення натурного експерименту [127]. За аналогічною схемою вимірювались температури в точках T_1-T_5 моделі по довжині пластини припою і точках T_5-T_{10} по її ширині (рис.5.9).

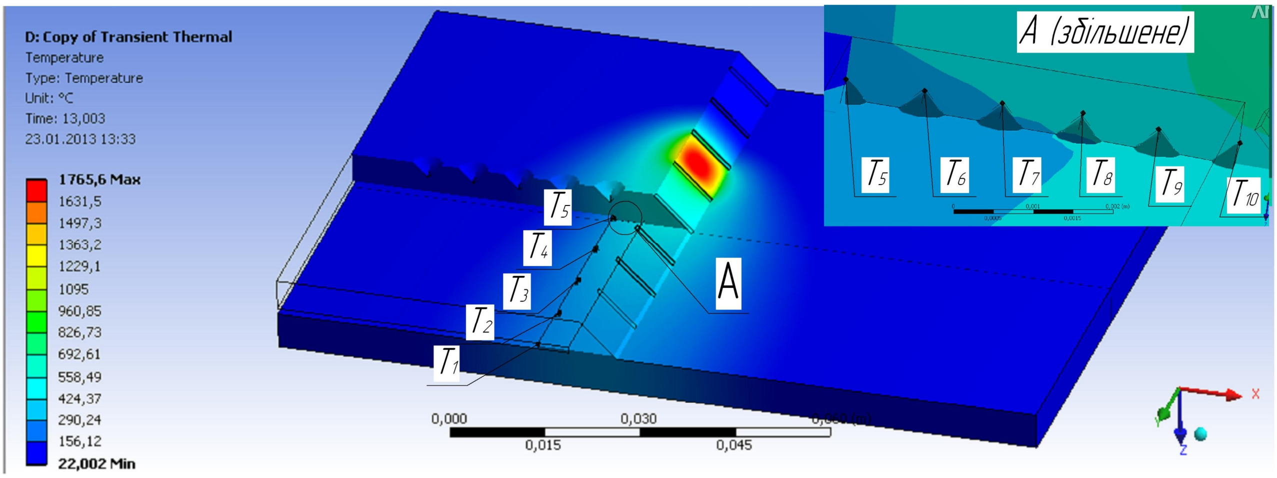


Рисунок 5.9 – Модель для визначення параметрів процесу зварювання-паяння

Розроблена комп’ютерна модель конструкції у вигляді двох пластин товщиною 5 мм та смужки припою 5x1мм і заданих режимів зварювання дозволила отримати термограми для вказаних точок (рис. 5.10). З графіка видно, що температура в точці T_1 є мінімальною і досягає значення 932 °C на третій секунді після початку зварювання. Для забезпечення повного розплавлення припою його температура плавлення повинна бути дещо меншою.

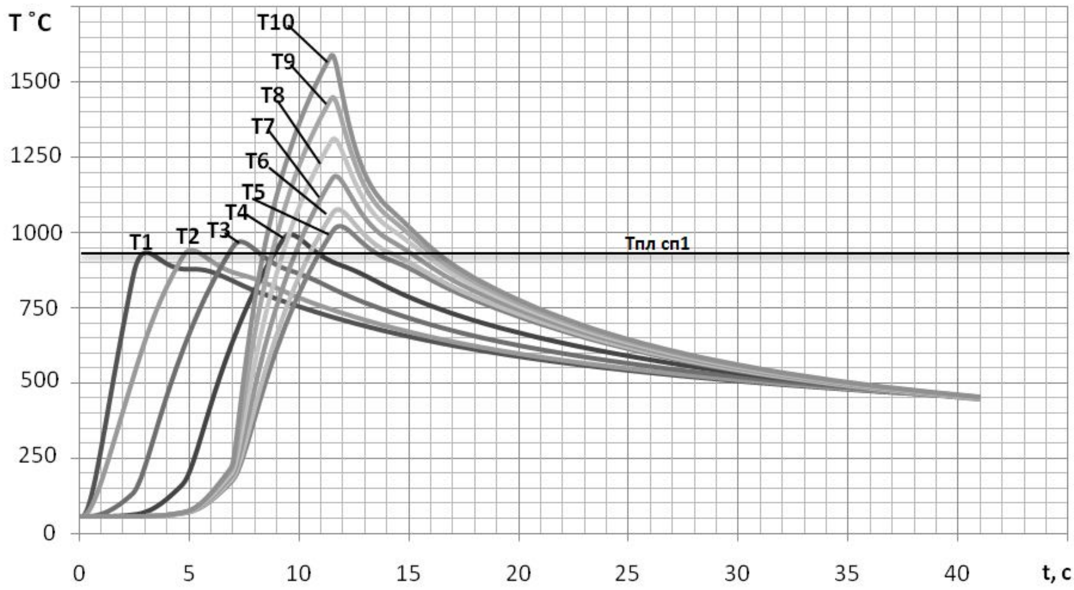


Рисунок 5.10 – Температури у точках навколошовної зони (модельні розрахунки)

Для вибору припою доцільно використати діаграму стану, з якої видно, що така температура є достатньою для розплавлення припою із концентрацією компонентів, що відповідає області діаграми стану сплаву Cu-Zn, розташованої праворуч від лінії Сп.I (див. рис. 5.8 а). У випадку використання припою на основі міді з марганцем слід обрати сплав із проміжку між лініями Сп. II-III (див. рис. 5.8 б).

Для розплавлення припою із заданою концентрацією компонентів, у відповідності до експлуатаційних вимог, змінювали (розраховували) режими зварювання (силу струму, швидкість, кут нахилу електроду). У випадках, коли повне розплавлення припою за рахунок тепла, що виділялось при зварюванні, ставало неможливим, конструкція попередньо підігрівалась. Макрошліфи з‘єднань, отриманих при різних режимах, наведені на рисунку 5.11. У всіх випадках мідь повністю розплавилась, заповнивши проміжок між деталями зі сторони зварного шва.

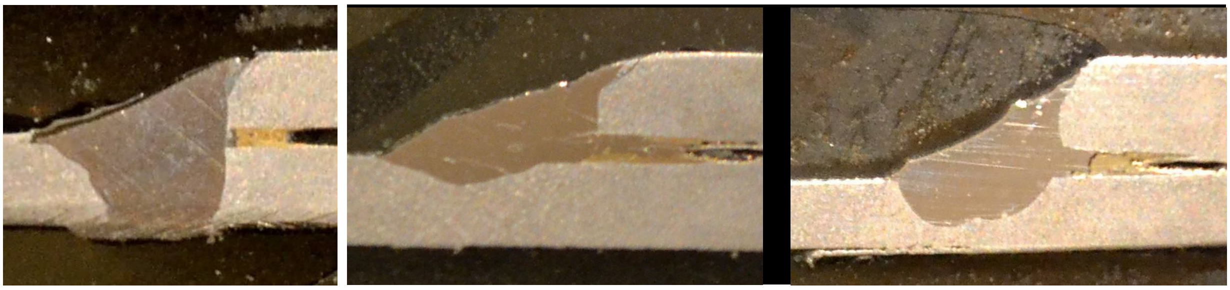
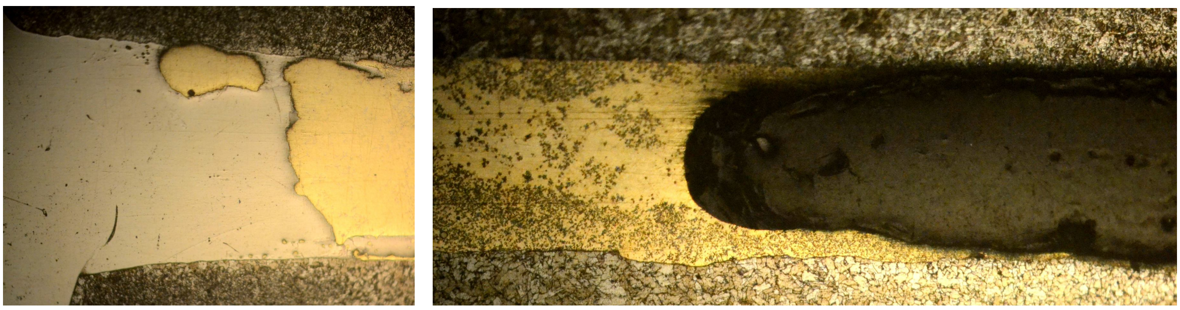


Рисунок 5.11 – Макрошліфи паяно-зварних з‘єднань



а) б)

Рисунок 5.12 – границі сплавлення між сталлю і міддю:

а) із сторони зварного шва; б) із протилежної сторони від зварного шва

Мікроструктурний аналіз зони сплавлення між сталлю і міддю показав наявність чіткої границі без включень і несплавлень. У деяких випадках виявлено взаємопроникнення металу зварного шва і припою (рис. 5.12 а). Проте, таке перемішування локальне, не поширюється у глиб зварного шва і, тому, не впливає на механічні властивості з'єднання. Інший край мідного припою (рис. 5.12 б), за рахунок високої рідкотекучості та сил поверхневого натягу, розтікається на певну відстань по поверхні сталі, тим самим забезпечуючи їй додатковий корозійний захист.

Для визначення запасу міцності зразків, заварених за описаною вище технологією, нами було проведено випробування на розривній машині. Оскільки чітких стандартів щодо проведення випробувань зварних з'єднань внапуск знайдено не було, вирішено використати відомі методики випробувань, що подібні з умовами роботи конструкції, описані в [112]. Схеми випробовувань показано на рисунку 5.13.

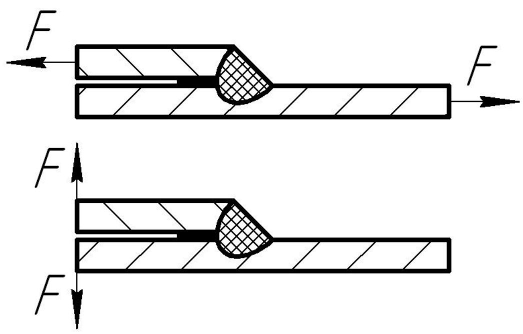


Рисунок 5.13 – Схеми випробувань: а- зсув, б- позацентровий розтяг

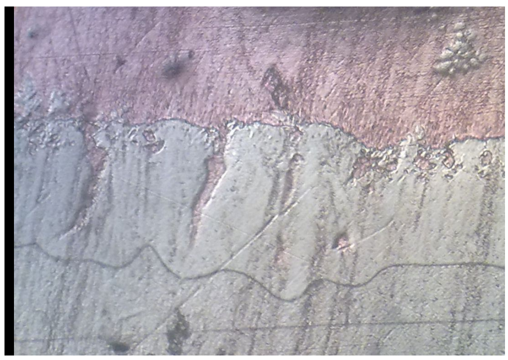


Рисунок 5.14 – Границі сплавлення між сталлю і міддю

В результаті випробувань на зсув встановлено, що руйнування усіх зразків відбувалось поза зварним швом та зоною запаювання, у зоні температурного впливу. У випробуваннях на позацентровий розтяг виявлено, що руйнування місця зпаювання має в'язкий характер, відбувається по криволінійній поверхні і, в деяких місцях, проходить по основному металу деталі без руйнування припою, що свідчить про високу міцність такого з'єднання.

Разом з тим, при використанні технології зварювання з супутнім паянням для ремонту не виключена можливість попадання мідного припою в зварний шов. Тому нами проведено дослідження впливу такого легування зварного шва на зміну механічних властивостей, а саме на показники ударної в'язкості зварних з'єднань. Такого роду інформація є досить важливою при реалізації зварювання-паяння, оскільки потрібно знати як зміняться властивості зварного з'єднання в результаті попадання до нього припою та сил адгезії, що виникають при розплавленні припою.

В даній роботі виконані дослідження впливу вмісту міді в шві на ударну в'язкість зварених зразків. Визначення ударної в'язкості проводили за ГОСТ 9454-78. Легування шва проводили шляхом розміщення мідного припою у вигляді смужки між зварними деталями, яка в процесі зварювання розплавлялась (рис. 5.15). Кількість міді у зварному шві регламентувалась шириною пластинки припою і коливалась в межах до 4%.

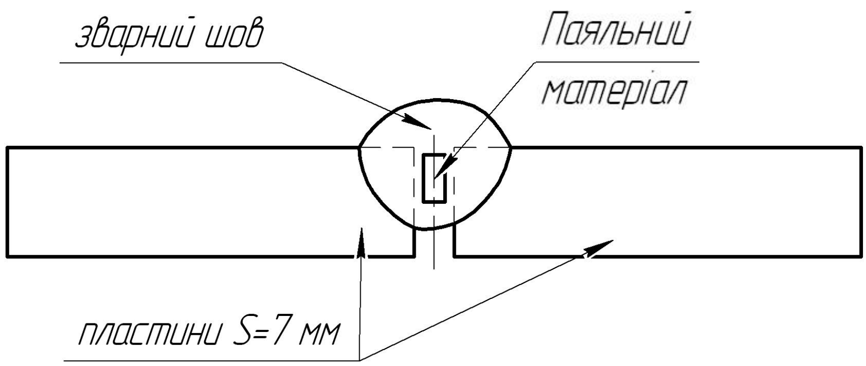
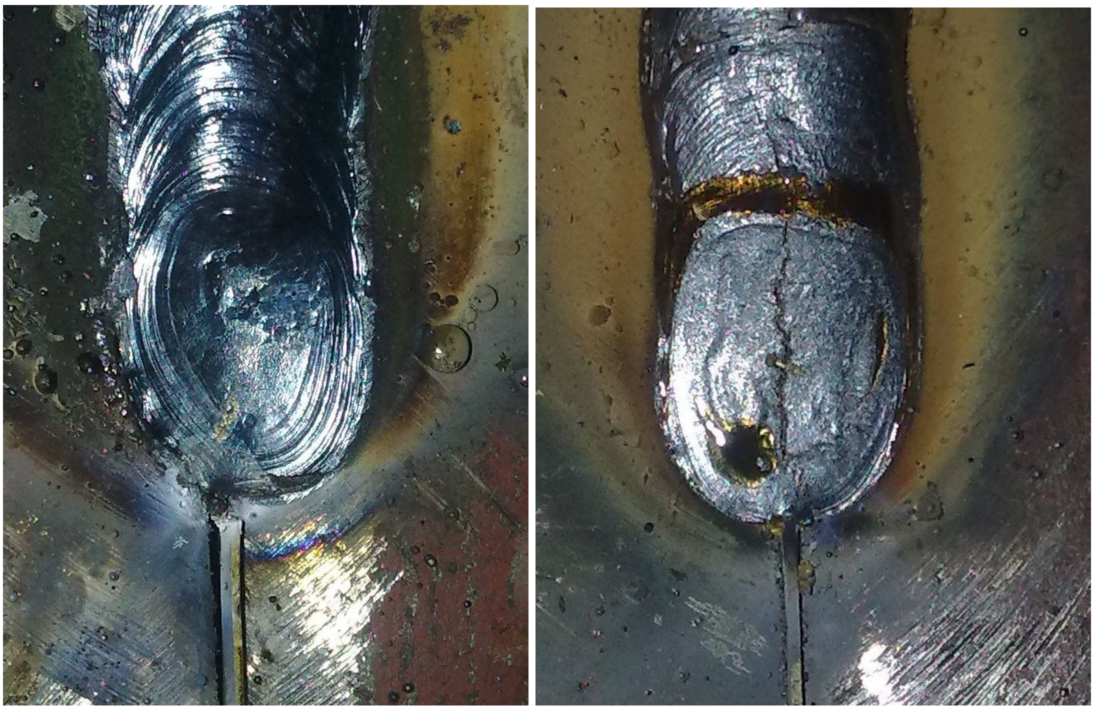


Рисунок 5.15 – Схема легування шва

Зварювання проводили на прямій полярності електродом УОНИ 13/45 та в середовищі вуглекислого газу дротом Св 08Г2СА.

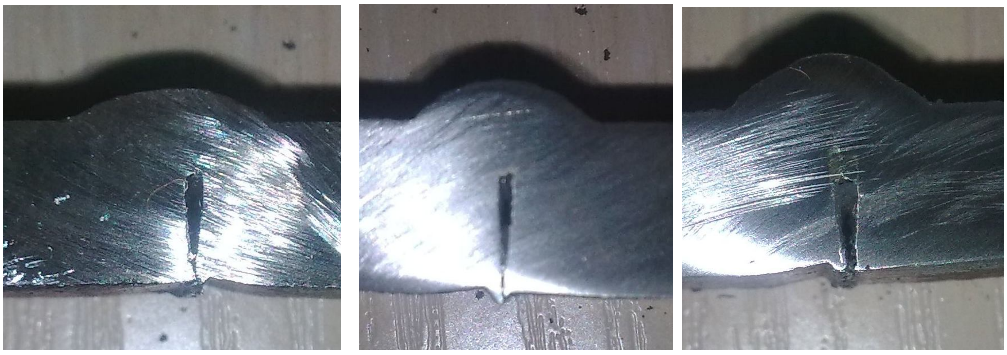
Наявність мідного припою не погіршувало процесу зварювання і не змінювало формоутворювання шва та його геометрії. Дослідження кратерів, що навмисне не заварювались при ручному дуговому зварюванні, показало наявність в центрах поодиноких дефектів (пор, дрібних тріщин) у місці підтікання припою. При напівавтоматичному зварюванні в середовищі CO_2 мали місце магістральні тріщини, що заходили на певну відстань в зварний шов. Тому, зварювання в середовищі CO_2 не рекомендується застосовувати, а подальші випробування таких зразків не проводились.



а) б)

Рисунок 5.16 – Кратер зварного шва: а) ручного дугового зварювання; б) напівавтоматичного в середовищі CO_2.

Після зварювання проводили виготовлення зразків для визначення ударної в’язкості та супутньо проводили макроаналіз поперечного перерізу зварних швів, який показав повне розплавлення припою у зразках з вмістом міді до 2%. На межі 2% виявлено ледь помітне випотівання міді по кореню шва. Із збільшенням частки міді її надлишки накопичуються в корені шва, заповнюючи зону непровару. На всіх зразках не виявлено дефектів.



а) б) в)

Рисунок 5.17 – Макрошліфи швів з часткою припою в зварному шві: а) 0.68%; б) 2.05%; в) 2.09%.

Випробування на ударну в'язкість проводилися на маятниковому копрі моделі 2010 КМ – 30 з енергією удару 300 Дж. Значення ударної в'язкості для зразків, заварених без припою та з різною кількістю припою, наведено в табл. 5.1

Таблиця 5.1 – Значення ударної в'язкості

Об'ємна частка припою %	0	0,68	1,36	2,05	2,73	3,41	4,09
КС зразка №1, кГ·м/см^2	5,4	3,4	3	2,4	3,8	2,2	4,4
КС зразка №2, кГ·м/см^2	4,4	3,4	1,6	3,8	3,6	1	5,8
КС зразка №3, кГ·м/см^2	5,6	2,2	3,6	3,4	3	7,8	2,8
Середнє значення	5,13	3	2,73	3,2	3,47	3,67	4,33

Із усередненого графіку (рис. 5.18) видно, що із збільшенням частки припою у зварному шві до 1,36% відбувається зменшення ударної в'язкості. Проте, із подальшим збільшенням частки припою показники ударної в'язкості зростають.

Рисунок 5.18 – Залежність ударної в’язкості зварного шва від об’ємної частки припою у ньому

Кількість введеного припою обмежувалась можливістю його повного розплавлення. При повторенні експерименту із збільшенням вмісту мідного припою до 8% руйнування відбувалось не по зварному шві, а по зоні термічного впливу і коливалося в межах 4,6 ... 5,1 кГ·м/см^2.

5.3 Інженерна методика виконання робіт з підсилення або ремонту рамних конструкцій транспортних засобів.

В умовах масового виробництва машин (транспортних, технологічних або спеціального призначення) практично неможливо достатньо точно оцінити та врахувати умови експлуатації та зовнішні фактори впливу на конструкцію. Крім того, виникає необхідність у встановленні додаткового обладнання, що створює навантаження, які не були враховані в проекті серійної машини. Такі обставини змушують розглядати питання можливості реалізації поставлених задач або розробки заходів щодо підсилення окремих ділянок несучої системи.

Для забезпечення якісного підсилення рам засобів транспорту запропоновано тристадійний алгоритм:

1. Моделювання рамної конструкції та оцінка навантажень з визначенням проблемних ділянок на основі використання комп’ютерної техніки та пакетів прикладних програм (ППП).

2. Вибір виду та параметрів елементів підсилення (накладок) та структури технологічного процесу їх встановлення.

3. Розрахунки параметрів та реалізація технологічних процесів підсилення рамних конструкцій транспортних засобів.

Перша стадія може проводитись без залучення транспортного засобу і складається з етапів:

1.1 На основі технічної документації, схем, креслень та баз данних будується 3D-модель рами транспортного засобу. Для її побудови можна використати переважну більшість CAD-систем, зокрема КОМПАС-3D, AUTOCAD, SolidWorks або модуль програм кінцево-елементного аналізу. Після закінчення побудови моделі, її необхідно зберегти у одному із форматів, що розпізнає програма кінцево-елементного аналізу, наприклад igs, sat чи x_t.

1.2 Для використання побудованої моделі в подальших розрахунках особливо важливим є виділення місць дії силових впливів та їх напрямів, що виникають в процесі експлуатації (зони рами з експлуатаційними навантаженнями). Практично це місця кріплення кузова, елементів підвіски, додаткового навантажувально-розвантажувального обладнання тощо.

1.3. Для подальших досліджень 3D-модель рами імпортується в середовище пакету прикладних програм (ППП) кінцевоелементного аналізу. Матеріалам, з яких виготовлені елементи моделі, автоматично присвоюються стандартні фізико-механічні властивості. Тому на даному етапі необхідно корегувати властивості матеріалу деталей, що аналізуються, (густину, коефіцієнти теплопровідності, міцність, модулі пружності тощо) або обрати матеріал із бази даних програми із наперед визначеними властивостями.

1.4. Після створення твердотільної моделі генерується її кінцево-елементний аналог, тобто сітка вузлів та елементів. Кількість скінчених елементів, на які розбивається 3-D аналог деталі, впливає на тривалість розрахунків програми і, найголовніше, на точність отриманих результатів. Більш детальне розбиття деталі, тобто більша кількість скінчених елементів, підвищує точність розрахунків, проте значно збільшує час їх виконання.

1.5. Проводиться визначення навантажень, яким піддається конструкція рами в типових умовах експлуатації. Кількість варіантів типових умов експлуатації відповідає кількості задач, що необхідно розв’язати в середовищі ППП.

1.6. Результатом розв’язку цих задач є картини полів напружень та деформацій рами в типових умовах експлуатації. Вона дає можливість робити висновки про величину та знак напружень, що виникають в матеріалі рами, а також виділити зони, які працюють з мінімальним запасом міцності.

2.1. На даному етапі пропонується виконати підготовчі операції (за необхідності), очищення та дефектування визначених зон рам. Дефектування пропонується проводити із застосуванням оптичної, флуоресцентної, ультразвукової та іншої апаратури. За наявності дефектів рамної конструкції у вигляді тріщин їх пропонується ремонтувати.

2.2. З врахуванням попередньо отриманих даних про поля напружень визначають форму (переріз) та розміри елементів підсилення. Форма обирається таким чином, щоб забезпечити повне перекриття зон, які працюють з граничними навантаженнями і мінімізувати залишкові напруження від зварювання. Це досягається за рахунок вибору оптимального перерізу профілю, та забезпечення округлень контурів.

2.3. Після визначення параметрів елементів підсилення визначають структуру основних операцій підсилення. На цьому етапі приймаються рішення про необхідність дублюючих елементів підсилення, схему їх приварювання, необхідність корозійного захисту тощо.

Розрахунки режимів приварювання елементів підсилення пропонується проводити з врахуванням умов експлуатації та структури технологічного процесу встановлення.

3.1. Виявленні в процесі діагностування тріщини заварюються. Для цього проводять підготовку тріщин до заварювання, яка, за необхідності, включає такі операції: забезпечення доступу до місця зварювання, виправлення та закріплення у правильному положенні елементів рами автомобіля, визначення видимого кінця тріщини, свердління отворів по кінцях тріщини та розроблення крайок тріщини. Тріщину необхідно засвердлювати у вершині свердлом діаметром 3 мм, розроблення крайок тріщини проводити під кутом 60˚ на глибину до половини товщини матеріалу деталі, також проводити зачистку крайок тріщини шириною 20 мм сталевою щіткою. Під час заварювання наскрізних тріщин на конструкціях рам з товщиною стінки більше 8 мм їх обробляють Х-подібно. Заварювання тріщини рекомендується виконувати електродуговим зварюванням електродами УОНІ 13/55 ГОСТ 9467-75 на постійному струмі при зворотній полярності.

3.2. У випадку дублювання приварюваних накладок для підсилення рекомендується реалізувати технологію попереднього і супутнього підігрівів. Для цього накладки встановлюють таким чином, щоб відстань між їх контурами становила близько 20 мм, а приварювання проводять короткими швами у шаховому порядку. Довжина шва визначається товщиною стінки рами. Для рам з товщиною стінки 5 мм і потужністю процесу зварювання 20 Вт/мм^2 довжина однієї ділянки шва повинна становити не більше 100 мм, при збільшенні товщини на 1 мм довжину ділянки шва необхідно зменшувати на 10 мм. Час зміни положення зварювальника при цьому незмінний і складає 30 секунд.

3.3 Шляхом використання раціональної техніки виконання зварювальних робіт можливо отримати залишкові напруження, які будуть частково компенсувати експлуатаційні. Це реалізується, наприклад, шляхом вибору бокового кута нахилу електрода під час виконання з’єднань внапуск. Він може змінюватись в межах 30...60° і частково визначає характер залишкових напружень після зварювання. Тому, якщо зварювання проводять на профільованих ділянках з напруженнями розтягу, кут нахилу повинен бути близьким 30˚або 60˚, з напруженнями стиску – 45˚.

3.4. За необхідності додаткового підсилення ділянки рами, де виконують зварювання, та забезпечення її корозійного захисту, під час встановлення накладок, пропонується використовувати зварювання з супутнім паянням. Для цього за схемою, показаною на рис. 5.7, встановлюється смужка припою паралельно до зварного шва. Товщина смужки припою обирається в межах 0,5 ... 1,5 мм в залежності від рекомендованого гостом зазору. Ширина смужки визначається можливістю її розплавлення в процесі зварювання і залежить від матеріалу припою (температури плавлення, теплопровідності), режиму зварювання, товщини стінок рамної конструкції і елементів підсилення тощо.

Для випадку приварювання накладки товщиною 5 мм в таблицях 5.2, 5.3 наведені дані щодо вибору ширини смужки припою, яка залежить від кута нахилу електроду та товщини стінки рамної конструкції. Товщина смужки припою при цьому становить 1 мм, потужність зварювання 37 Вт/мм^2. Зварювання проводити електродом діаметром 4 мм на постійному струмі прямої полярності.

Таблиця 5.2 – Ширина смужки припою з $T_{пл}$=800 ˚С

Кут α˚	Товщина стінки лонжерона рами, мм						
	5	6	7	8	9	10	12
	Ширина смужки припою з $T_{пл}$=800 °С, мм						
30˚	5,2	4,5	3,8	3,5	3,2	3	3
35˚	5,3	4,6	3,9	3,5	3,2	3	3
40˚	5,4	4,7	4,1	3,6	3,2	3	3
45˚	5,6	4,8	4,2	3,6	3,2	3	3
50˚	6	4,9	4,5	3,7	3,2	3	3
55˚	6,6	5,1	4,8	3,8	3,3	3,1	3
60˚	8,2	6,5	5,3	4	3,4	3,1	3

Таблиця 5.3 – Ширина смужки припою з $T_{пл}$=600 °C

Кут α°	Товщина стінки лонжерона рами, мм						
	5	6	7	8	9	10	12
	Ширина смужки припою з $T_{пл}$=600 °C, мм						
30°	9,2	7,1	6,7	6,2	5,7	5,2	5,1
35°	9,5	7,6	6,9	6,3	5,8	5,2	5,1
40°	10	8,4	7,2	6,4	6	5,3	5,1
45°	10,5	9	7,6	6,8	6,3	5,4	5,1
50°	11	9,7	8	7,3	6,6	5,5	5,2
55°	12	10,3	8,9	7,9	6	5,7	5,2
60°	13	12	10	8,5	7,6	6	5,2

Для більшої товщини стінок лонжерона рами розрахунки не проводились, оскільки ширина смужки припою, що може бути розплавлена, практично не змінюється.

5.5 Після ремонту та підсилення ушкодженої ділянки рамної конструкції провести контроль якості виконаних робіт.

Далі наведено приклад виконання робіт з ремонту та підсилення рамної конструкції вантажного автомобіля ЗИЛ. Діагностуванням небезпечних з позиції виникнення пошкоджень ділянок виявлено дефект у вигляді поперечної тріщини, яка починалася від крайки нижньої полиці лонжерона і проходила до його середини.

Тріщина заварювалась згідно наведеної вище технології (рис. 5.19). Після заварювання тріщини встановлювали підсилювальну накладку (рис. 5.20), товщина якої становила 6 мм. В загальному випадку товщина накладок може коливатись в межах 2-8 мм, в залежності від конструкції, що ремонтується, та умов її роботи.

Накладку встановлювали симетрично відносно завареної тріщини. Перед встановленням накладки зварний шов зачищали, а на накладку встановлювали пластинки припою. Накладку в зборі прихоплювали в 3-4-х місцях і потім приварювали за описаною вище технологією.

Рисунок 5.19 – Заварена тріщина

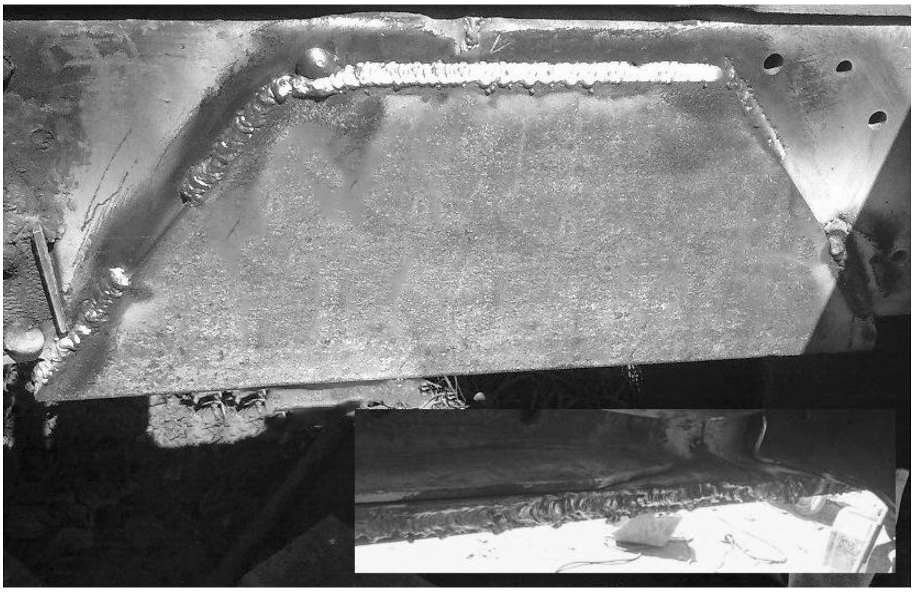


Рисунок 5.20 – Лонжерон з привареною накладкою

Протягом експлуатації транспортного засобу проводились систематичні огляди відремонтованої ділянки рами. Після 4 років роботи, а це біля 300 тис. км. пробігу, встановлено, що розроблена технологія забезпечує високу міцність відремонтованих конструкцій.

5.5 Витривалість нових та відремонтованих рамних конструкцій

Випробовування рам в зборі та їх окремих вузлів і деталей знакозмінним вигином або знакозмінним крученням здійснювалося, головним чином, на стендах з використанням резонансного принципу. В окремих випадках навантаження здійснювалося за допомогою гідропульсаційних установок.

Для перевірки ефективності різних способів ремонту були обрані два найбільш часто виникаючі дефекти: тріщина в середній частині поздовжньої балки від вигину і тріщина поздовжньої балки від кручення в вузлі першої поперечки.

Ушкоджені тріщинами рами умовно поділили на 2 групи. При ремонті першої групи рам використали технологію заварювання тріщин з дотриманням рекомендацій описаних в підрозділах 3.2-3.3.

Дефекти другої усували за такою технологією: визначали границі тріщини; просвердлювали отвори діаметром 5 мм на відстані 10 мм від видимої границі тріщини по лінії її напрямку; зачищали поверхні по обидва боки тріщини на ширині 20 мм наждачним кругом з гнучким валом; обробляли кромки тріщини під кутом 90° на глибину 4 мм; заварювали тріщини електродами УОНИ-13/55, діаметром 3 мм і постійним струмом силою 110-120 А; зачищали шов врівень з основним металом; приварювали трикутну накладку електродом тієї ж марки діаметром 5 мм при силі постійного струму 200-220 А.

Крім того, для частини рам першої і другої групи використовували технологію зварювання з супутнім паянням.

Рами в зборі після усунення пошкоджень в середній частині поздовжніх балок (лонжеронів) випробовували на стенді за методикою, описаною в розділі 2. Результати випробовувань та величини прикладених навантажень занесені в таблицю 5.4.

Таблиця 5.4 – Результати випробувань на стенді

Випробувані рами	Балки (лонжерони)	максимальна напруга циклу,кг/мм^2 згин	максимальна напруга циклу,кг/мм^2 кручення	Кількість циклів до руйнування,
2	Відремонтована, зміцнена супутнім запаюванням	17,5	2,0	753
1		21,0	3,5	1852
2	Відремонтована, не зміцнена	17,5	2,0	607
1		21,0	3,5	1281
2	Відремонтована, не зміцнена	17,5	2,0	816
1		21,0	3,5	1107
2	Відремонтована, не зміцнена	21,0	3,5	920
1		17,5	2,0	1452
2	Відремонтована, зміцнена супутнім запаюванням	21,0	3,0	1192
1		17,5	2,0	1867
2	Відремонтована, зміцнена супутнім запаюванням	17,5	2,0	920
1		21,0	3,5	1590,0
1	Нова	18,5	3,5	2364,1
1	Нова			
	перша ступінь випробування	18,0	3,5	1500,0
	друга ступінь випробування	22,5	4,5	513,3
1	Нова			
	перша ступінь випробування	18,0	3,5	1467,7
	друга ступінь випробування	22,5	4,5	561,6

Якщо ж порівняти довговічність відремонтованих і нових балок, то виявиться, що за умов виконання усіх рекомендацій, запропонованих вище, ресурс рами вдається збільшити на 70-72%.

Аналіз даних таблиці 5.4 утруднений через те, що перетин нових балок і балок відремонтованих був неоднаковий. Для полегшення аналізу, дані таблиці 5.4 представлені у вигляді діаграми (рис. 5.21), в якій висота стовпчиків пропорційна кількості циклів до руйнування. Балки з 1 по 11 випробовували на згин в діапазоні σ_{max} = 175...210 МПа і кручення σ_{max} = 20...35 МПа. Нову балку 13, 14 і 15 випробовували на згин при σ_{max} = 180 МПа і кручення σ_{max} = 35 МПа до 1500 і 1467 циклів, потім збільшили навантаження до σ_{max} = 225 МПа і σ_{max}= 45 МПа.

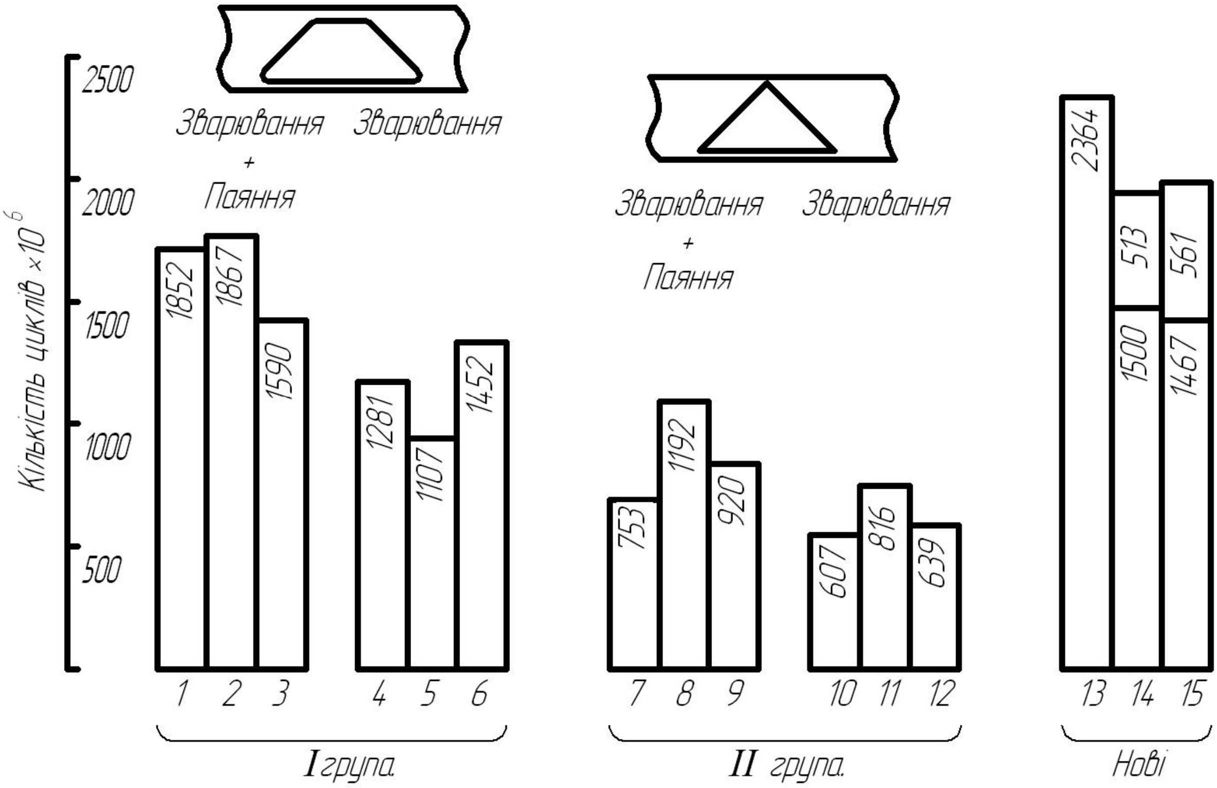


Рис. 5.21 – Напрацювання нових та відремонтованих рам

З діаграм видно суттєву перевагу нових балок 13, 14 15, хоча їх випробовування, як було зазначено, проводилось при більш важкому режимі навантаження. Та, мабуть, при однаковому режимі випробування ця перевага виявилося б більш чіткою, як ми це помітили при розгляді результатів випробування на кручення. Разом з тим, на діаграмі добре виявляється перевага відремонтованих і зміцнених запаюванням балок 1, 2, 3 (у І групі) і 7, 8, 9 (в ІІ групі) у порівнянні з такими ж незміцненими балками 4, 5 і 6 (у І групі) і 10,11, 12 (у ІІ групі).

В цілому, отримані результати підтверджують можливість використання розглянутих технологій на ремонтних виробництвах, разом з тим, вони показують, що зміцненням супутнім запаюванням можна істотно підвищити втомну міцність відремонтованих рам.

Висновки до розділу 5

1. Розглянута технологія заліковування тріщин мідними сплавами. Доведено позитивний вплив цього процесу на міцність та довговічність пошкоджених тріщинами сталевих деталей.

2. Встановлено, що заліковування тріщин мідними сплавами забезпечує необхідну розривну міцність зон сталевих конструкцій, що піддавались обробці.

3. Розроблено технологію та ряд практичних рекомендацій щодо використання зварювання з одночасним паянням, яке реалізується за рахунок тепла зварювальної дуги та припоїв на основі міді, для проведення ремонту поперечних тріщин рам транспортної техніки, шляхом встановлення підсилювальних накладок.

4. Наведена методика, що ґрунтується на використанні програм кінцево-елементного аналізу, дає можливість визначати раціональні параметри режиму зварювання з супутнім паянням.

5. Відновлювання та зміцнення сталевих конструкцій шляхом використання зварювання і супутнього паяння з використанням припоїв на основі міді окрім підвищення характеристик міцності такого з’єднання забезпечує корозійний захист зони термічного впливу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-технічну задачу збільшення терміну експлуатації рам засобів транспорту за рахунок вдосконалення технології їх ремонту та відновлення. Теоретичними і експериментальними дослідженнями отримані такі наукові результати:

1. Для виявлення розташування та розмірів ділянок рам автотранспорту, з напруженнями, що можуть викликати появу тріщин, доцільно використовувати метод кінцево-елементного аналізу. Встановлено, що об'єм матеріалу деталей, в яких виникають такі напруження, становить біля 12–14% від об'єму металу усієї конструкції рами.

2. На основі проведеного комплексного аналізу типової конструкції, доведено можливість та доцільність ремонту рамних конструкцій транспортних засобів, пошкоджених наскрізними поперечними тріщинами.

3. Розроблено моделі у середовищі програм кінцево-елементного аналізу, що дають можливість чітко визначати найбільш раціональні параметри підсилюючих елементів. Для рамних конструкцій з лонжеронами швелерного типу доцільними є накладки у формі трапеції, які, по можливості, дублюються, причому обидві мають однакову конфігурацію, а розміри відрізняються на величину, що залежить від параметрів зон термічного впливу.

4. Експериментально та в середовищі програм кінцево-елементного аналізу досліджено теплові процеси ремонту рами та їх вплив на поточні напруження та деформації. Наведена методика мінімізації напружень та деформацій на етапах розробки технологічного процесу ремонтного зварювання. При проведенні перевірки адекватності результатів дослідження похибка складає менше 5%.

5. З використанням розробленої моделі у середовищі програм кінцево-елементного аналізу встановлено, що відстань між зварними швами накладок, що дублюються з обох сторін пошкодженої тріщинами деталі

металоконструкції, повинна визначатись в залежності від режимів зварювання та параметрів рамних конструкцій транспортних засобів. Для дослідженої конструкції лонжерона рами з товщиною 8 мм рекомендується накладати паралельні шви на відстані 20 мм.

6. Дослідження теплових процесів встановлення накладок на ушкоджених ділянках рами показало концентрацію напружень біля гострих кутів елементів підсилення. Встановлено, що найбільш ефективними з точки зору формування напружень та досягнення максимальної надійності є накладки із округленням гострих кутів. Для досліджуваної конструкції необхідний радіус округлення становить 15-20 мм.

7. Використання методики мінімізації напружень та деформацій на етапах розробки технологічного процесу ремонтного зварювання, що передбачає приварювання накладок короткими швами у шаховому порядку, забезпечило зниження на 15% поточних напружень і на 12% деформацій.

8. Встановлено різний вплив техніки виконання швів, зокрема просторового положення електрода під час приварювання елементів підсилення, на НДС рами в залежності від її профілю. Для рам з П-подібним профілем зменшення напружень та деформацій забезпечує зварювання з кутом нахилу електроду біля 60˚.

9. Доведено можливість та доцільність поєднання процесів зварювання та паяння за рахунок тепла, що виділяється в процесі горіння дуги. Застосування такого зварювання з використанням припоїв на основі міді для проведення ремонту поперечних тріщин рам транспортної техніки, шляхом встановлення підсилюючих накладок, підвищує напрацювання конструкції на 15-20%.

10. Відновлювання та зміцнення рам шляхом використання зварювання з одночасним паянням за рахунок тепла процесу зварювання з використанням припоїв на основі міді окрім підвищення характеристик міцності такого з'єднання забезпечує корозійний захист зони термічного впливу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Туревский И. С. Теория автомобиля: Учеб. Пособие / И. С. Туревский. – М.: Высш. шк., 2005. – 240 с.

2. Краткий автомобильный справочник / А.Н. Понизовкин, Ю.М. Власко, М.Б. Ляликов и др. — М: АО "ТРАНСКОСАЛ-ТИНГ", НИИАТ, 1994. — 779 с.

3. Гельфгат Д. Б. Рамы грузовых автомобилей / Д. Б. Гельфгат, В. А. Ошноков. – К.: Машгиз, 1959. – 234 с.

4. КрАЗ. Люди. Завод. Автомобили. 2006. Режим доступу: http://www.dymz.ru/817-napryazheniya_v_lonzheronach.html.

5. Прокат для судостроения из стали нормальной, повышенной и высокой прочности ГОСТ Р 52927 – 2008. [Утвержден и введен в действие от 19 июня 2008.] – М. : Ростехрегулирование 2009. – IV, 231 с.

6. Волченко В. Н. Сварка и свариваемые материалы : справочник: в 3 т. / В. Н. Волченко, Э. Л. Макаров, В. В. Шип; общ. ред. Волченко В. Н. – М. : Металлургия, 1991. – Т. 1. – 526 с. – ISBN 5-229-00816-4.

7. Справочник технолога авторемонтного производства / [под ред. Г.А. Малышева]. – М.: Транспорт, 1977. – 432с.

8. Биргер И. А. Сопротивление материалов: Учебное пособие / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов – М. : Наука, 1986. – 560 с.

9. Биргер И. А. Прочность, устойчивость, колебания; [у 3 т.]. / Под ред. И. А. Биргера. – М. : Машиностроение, 1968. – Т.1. – 832 с.

10. Власов В. З. Тонкостенные упругие стержни / В. З. Власов. – М.: Физматгиз, 1959. – 200 с.

11. Горбунов Б. Н. Теория рам из тонкостенных стержней / Б. Н. Горбунов, А. И. Стрельбицкая – М .: Гостехиздат, 1948. – 250 с.

12. Проскуряков В. Б. Еще один метод расчета автомобильных рам на кручени / В. Б. Проскуряков, Г. Е. Павлова // Автомобильная промышленность. – 1966. – №5. – С.25 – 28.

13. Garret T. K. Automobile dynamic loads / T. K. Garret // Automobile engineer. – 1953. – V.43, №563. – P.60 – 64.

14. Бычков Д. В. Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций / Д. В. Бычков – М. : Стройиздат, 1962. – 230 с.

15. Апанович Ю. Н. Автоматизированный расчет и доводка конструкций автомобильных рам / Ю. Н. Апанович // III Всесоюзное научно-техническое совещание «Динамика и прочность автомобиля» 22 – 25 ноября 1988г. : Тезисы докладов. – М. : Типография НАМИ, 1988. – С.28

16. Beermann H. J. Static analysis of commercial vehicle frames: a hybrid finite element and analytical - method / H. J. Beermann // International Journal of Vehicle Design. – 1984. – V.5, №1 – 2. – P.26 – 52.

17. Beermann H. J. Torsion von Nutzfahrzeugrahmen mit offenen und geschlossenen Querschnittsprofilen / H. J. Beermann // Automobiltechnische Zeitschrift. – 1982. – V.82.№9. – P.459 – 464.

18. Beermann H. J. Wolbbehinderung in Knoten von Fahrzeugrahmen / H. J. Beermann // Leichtbau der Verkehrsfahrzeuge. – 1977. – S.1 – 6.

19. Oelschläger H. Nachgiebige Knoten bei der Torsionsberechnung von Nutzfahrzeugrahmen aus offenen Profinen / H. Oehlschlaeger // Automobiltechnische Zeitschrift. – 1986. – V.86, №3. – P.105 – 108.

20. Oelschläger H. Berucksichtigung von Quertrager – Aussparungen bei der Berechnung von Nutzfahrzeugrahmen / H. Oehlschlaeger // Leichtbau der Verkehrsfahrzeuge. – 1980. – V.4, №6 – P.74 – 84.

21. Голованов А. И. Расчет автомобильных рам с учетом податливости узлов / А. И. Голованов, В. В. Нехотяев // Исследования по теории пластин и оболочек. Казань: Изд-во Казан. Ун-та. - 1989. – вып. 21. – С. 67 – 72.

22. Барун В. Н. Снижение металлоемкости несущей системы втомобиля – самосвала КАМАЗ / В. Н. Барун, В. Н. Белокуров, П. Д. Павленко // Автомобильная промышленность. – 1983. – №9. – С.12 – 14.

23. Белокуров В. Н. Выбор схемы установки грузовой платформы на раме самосвала / В. Н. Белокуров // Второе Всесоюзное научно-техническое

совещание «Динамика и прочность автомобиля» 1 – 3 октября 198 6г. : Тезисы докладов. – М . : Типография НАМИ, 1986. – С. 28.

24. Белокуров В. Н. Пути снижения металлоемкости рам грузовых автомобилей / В. Н. Белокуров // Автомобильная промышленность. – 1982. – №10. – С.15 – 18.

25. Белокуров В. Н. Обработка и экспресс-анализ результатов прочностных испытаний автомобилей с использованием микро ЭВМ / В. Н. Белокуров, Г. А. Самойлов, А. В. Рубаненко // Автомобильная промышленность. – 1983. – №3. – С.15 – 16.

26. Захаров А. А. Строительная механика и расчет сооружений / А. А. Захаров // – Автомобильная промышленность. – 1982. – №5. – С.26 – 29.

27. Захаров А. А. Расчет системы рама платформа автомобилей – самосвалов на изгиб / А. А. Захаров // Автомобильная промышленность. – 1977. – №2. – С.18 – 33.

28. Захаров А. А. Использование метода моделирования связей при расчете автомобильных рам / А. А. Захаров, В. Н. Белокуров, М.Н. Закс // Автомобильная промышленность. – 1979. – №11. – С.8 – 12.

29. Белокуров В. Н. Регулирование крутильной жесткости рам автомобиля / В. Н. Белокуров, М. Н. Закс //Автомобильная промышленность. –1972. – №4. – С. 19 – 22.

30. Cooke C. J. Vehicle structural analysis / C. J.Cooke // Paper in the Seminar at the Inst. Mech. Engr.: Works for Rolls Roys. – 1968. – May 9

31. Courant R. Variational methods for the solution of probems of equilibrium and vibrations / R. Courant // Bulletin of the American Mathematical Society. – 1943. – V.49, №5. – P.1 – 23.

32. Argyris J. H. Energy and structural analysis: Part I. General theory / J. H. Argyris // Aircraft engineering. – 1954. – V. 26,October. – P.347 – 356; November. – P.383 – 387,394; 1955. – V.27,February. – P.42 – 58; March. – P.80 – 94; April. – P.125 – 134; May. – P.145 – 158.

33. Argyris J. H. Energy theorems and structural analysis: Part II. Application to thermal stress analysis and to upper and lower limits of Saint-Venant torsion constant / J. H. Argyris, S. Kelsey // Aircraft Engineering. – 1954. – V. 26. – December. – P.410 – 422.

34. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич – М. : Мир, 1975. – 541 с.

35. Галлагер Р. Метод конечных элементов: Основы. / Р. Галлагер – М. : Мир, 1984. – 428 с.

36. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд – М. : Мир, 1979. – 392 с.

37. Бате К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон – М. : Стройиздат, 1982. – 448 с.

38. Нории Д. Введение в метод конечных элементов / Д. Нории, Ж. Де Фриз – М. : Мир, 1987. – 304 с

39. Васидзу К. Вариационные принципы в теории упругости и пластичности / К. Васидзу – М. : Мир, 1987. – 560 с.

40. Лавров Е. Н. Использование пакетов MSC.Nastran, MSC.Patran при проектировании и оценке несущей способности конструкции перспективного многоцелевого автомобиля. // Материалы конференции MSC.– Миасс, 2005. С. 15 – 21.

41. Чигарев А. В. ANSYS для инженеров: Справ. пособие / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.

42. Дащенко А. Ф. Анализ напряженно-деформированного состояния рамы автомобильного полуприцепа в программе ANSYS / А. Ф. Дащенко, Н. Г. Сурьянинов, Д. В.Лазарева // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2005 – № 29. – С.20 – 30.

43. Альдайуб Зияд. Разработка методики создания рам грузовых автомобилей минимальной массы, отвечающих требованиям по ресурсу, на стадии проектирования : автореф. дис на соискание уч. степени канд. техн.

наук : спец. 05.05.03 «Колесные и гусеничные машины» / Альдайуб Зияд. – М., 2006. – 18 с.

44. Дащенко А. Ф. Анализ напряженно-деформированного состояния рамы автомобильного полуприцепа в программе ANSYS / А. Ф. Дащенко, Н. Г. Сурьянинов, Д. В.Лазарева // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2005 – № 29. – С.20 – 30.

45. Белокуров В. Н. Пути снижения металлоемкости рам грузовых автомобилей / В. Н. Белокуров // Автомобильная промышленность. – 1982. – №10. – С.15 – 18.

46. Кравченко А. П. Научные основы управления эффективностью эксплуатации автомобильных поездов: дис. ... доктора техн. наук: 05.22.20 / А. П. Кравченко // Национальный ун-т им. Владимира Даля. – Х.: ХНАДУ, 2006. – 480 с.

47 Проскуряков В. Б. Динамика и прочность рам и корпусов транспортных машин / В.Б. Проскуряков. – Л.: Машиностроение, 1972. – 227 с.

48. Розин JI. А. Вариационные постановки задач для упругих систем / Л. А. Розин. – Л. : ЛГУ, 1978. – 224 с.

49. Емельянов Н. Я, Эйдельман А. JI. К вопросу расчета рам автомобилей на изгиб в горизонтальной плоскости // Автомобильная промышленность. -1980. -№5.- С. 20-23.

50. Лукин П. П. Конструирование и расчет автомобиля / П. П.Лукин, Г. А. Гаспарянц, В .Ф.Родионов. – М. : Машиностроение, 1984. – 376 с.

51. Афанасьев Н. Н. Статестическая теория усталости металов / Н. Н. Афанасьев – К. : Издательство АН УССР, 1953. – С. 164 – 165.

52. Денисенко М. І. Втомні пошкодженння поверхонь деталей регулюючих робочих органів сільськогосподарської техніки / М. І. Денисенко // Науковий вісник НУБіП України. – 2010. – Випуск 144 (1). –С 35-41

53. Бакалець Д. В. Підвищення надійності та відновлення металоконструкцій транспортних та сільськогосподарських машин / Д. В. Бакалець, В. І. Савуляк, // Збірник наукових праць Вінницького

національного аграрного університету. Серія Технічні науки. – 2012. – Випуск 11(66). – Т. 2. – С.302–306.

54. Савуляк В. І. Вплив гідроманіпулятора мобільної машини на формування тріщинонебезпечних зон несучої конструкції / В. І. Савуляк, Д. В. Бакалець // Промислова гідравліка і пневматика: Всеукраїнський науково-технічний журнал. –2012. – №4 (34). – С. 36–41.

55. Дацишин О. П. Квазістатичний розвиток крайової тріщини при несамозрівноваженому навантаженні на її берегах / О. П. Дацишин, Г. П. Марченко // Физ.-хим. механика материалов. – 1991. – № 4. – С. 53 – 59.

56. Андрейкив А. Е. Усталостное разрушение и долговечность конструкций./ А.Е. Андрейкив, А. В. Дарчук – К. : Наук. думка, 1992. – 400 с.

57. Кравчук А. В. Особенности развития усталостных трещин в поверхностно – упрочненных деталях машин / А. В. Кравчук, А. Ф. Дащенко // Труды Одес. политехн. ун – та. – 1997. – № 1. – С. 33 – 34.

58. Колмогоров В. Л. Напряжение, деформация, разрушение / В. Л. Колмогоров – М. : Металлургия, 1970. – 312 с.

59. Саврук М. П. Механика разрушения и прочность материалов. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами: Справочное пособие в 4-х т./ М.П. Саврук – К. : Наук, думка. 1988 – Т.2 – 620 с.

60. Панасюк В. В. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках / В. В. Панасюк, М. П Саврук, А. П. Дацишин – К.: Наукова думка, 1976. –443 с.

61. Карпенко Г. В. Влияние среды на прочность и долговечность материалов / Г. В. Карпенко – К. : Наукова думка, 1976. – 125 с.

62. Пачурин Г. В. Закономерности сопротивления усталостному разрушению на воздухе и в коррозионной среде деформационно-упрочненных металлических материалов и повышение на их основе долговечности изделий: дис. д-ра техн. наук: 05.16.01 / Г. В. Пачурин //Нижегородский гос. техн. ун – т.– Н.: НГТУ, 2003. – 329 с.

63. Бідун О. Дефектування і втомлювальні відмови елементів стрілочних переводів. / Бідун О. // Збірник наукових праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології». – 2008. – № 13. – С. 25 – 28.

64. Гурман В. С. Ремонт автомобильных рам. / В. С. Гурман – М.: Транспорт, 1967. –100 с.

65. Denisenko N. Lengthening of resource of details and knots of machine with tireless damages / N. Denisenko, V. Voityuk // Motrol.– 2008. – № 10(B) – C.193–200.

66. Грабар І. Г. Руйнування рамних конструкцій транспортних засобів в умовах експлуатації / І. Г. Грабар, В. Є. Титаренко // Вісник ЖДТУ. – 2007. – № 3 – С.55 – 58.

67. Титаренко В. Є. Стенд для динамічних випробувань натурних елементів рами напівпричепа / В. Є. Титаренко //Вісник ЖДТУ. Технічні науки.– 2005. – № 3 (34).– С. 15 – 18.

68. Титаренко В. Е. Напряженно-деформированное состояние и долговечность рам полуприцепов: дис. … кандидата техн. наук : 01.02.04 / В. Е. Титаренко. –Тернополь., – 2006. – 201с.

69. Дурнопьянов И. И. Экспериментальные исследования рамы полуприцепа / И. И Дурнопьянов // Технические науки . Транспорт. Одесский национальный политехнический университет. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.rusnauka.com/29_DWS_2012/Tecnic/ 4_ 120752.doc.htm

70. Кобрин М. М. Классификация и анализ усталостних разрушений рам грузовых автомобилей, используемых в сельском хозяйстве / М. М. Кобрин – М.: Труди ГОСНИТИ, 1964. –112 с.

71. Кобрин М. М. Стендовие истытания рам грузових автомобилей / М. М. Кобрин, Л. М. Мельчук – М.: Автомобильная промышлинность, 1963. – 74 с.

72. Гурман В. С. Повисить долговечность автомобильних рам / В. С. Гурман, М. Кобрин, Л. М. Мельчук – М.: Транспорт, 1964. –94 с.

73. Доронин С. В. Оценка и регулирование свойств рам карьерных самосвалов с трещиноподобными дефектами / С. В. Доронин, Т. В. Донцова // Журнал сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2012. – № 6. – С. 703-714.

74. Доронин С. В. Проектные оценки долговечности и живучести рам карьерных самосвалов / С. В. Доронин, Т. В. Донцова // Журнал сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2012. – № 7. – С. 760–765

75. Инструкция по сварке и наплавке при ремонте грузовых вагонов ЦВ -201 –98. Режим доступу: http://stroyka-ip.ru/xsv_sv_odtog_o/cv-201-98/cv-201-98.html

76. Бабкин В. И. Оценка циклической трещиностойкости сварных подкрановых балок тяжелого режима работы : дис. ... кандидата. техн. наук.: 05.05.03 / В. И. Бабкин. – М., 1988. – 189 с.

77. Хан Дж. Концепция остановки трещины и ее применение / Дж. Хан, А. Розенфилд, К. Маршалл, Р. Хоагленд, П. Гелен, Каннинен М. // Механика разрушения. Быстрое разрушение, остановка трещин: сб. статей. М.: Мир. – 1981. – С. 222–253.

78. Кравчук А. В. Особенности развития усталостных трещин в поверхностно-упрочненных деталях машин / А. В. Кравчук, А. Ф. Дащенко // Труды Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 1997. – Вып. 1. – С. 33 - 34.

79. Механические свойства материалов при повышенных температурах. Пер. с англ. / Под ред. Гецова Л. Б. – М.: Металлургия, 1965. – 294 с.

80. Еремин К. И. Остаточный ресурс циклически нагруженных металлоконструкцийс трещиноподобными дефектами: Дисс. . д ра техн. наук.: 05.05.03 / Еремин К. И. – М., 1996. – 418 с.

81. Меннанов Э. М. НДС сварных стыков строительных конструкций сейсмостойких зданий / Э. М. Меннанов // Строительство и техногенная безопасность. – 2013. – № 45. – С.34-38.

82. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках. ИЭС им. Е. О. Патона / Под ред. В. И. Труфякова. – Киев: Наук, думка, 1990. – 256 с.

83. Астахова Т. В. Расчетно-экспериментальное обоснование конструктивных решений по остановке усталостных трещин в рамах карьерных автосамосвалов / С. В. Доронин, Ю. А. Плютов, Т. В. Астахова // Горное оборудование и электромеханика. – 2005. – № 3. – С. 31-33.

84. Астахова Т. В. Моделирование живучести поврежденных рамных конструкций карьерных автосамосвалов / С.В. Доронин, Т.В. Астахова // Современные технологии освоения минеральных ресурсов: Сб. научн. тр. Выпуск 4. / Под общ. ред. В.Е. Кислякова; ГУЦМиЗ. – Красноярск, 2006. – С. 195-197.

85. Патент на корисну модель 31166 Україна, МПК В23К35/365. Плавкий біметалевий електрод для зварювання та наплавлення / Савуляк В. І, Заболотний С. А. — № u200714146 Заявл. 17.12.2007; Опубл. 25.03.2008. Бюл. №6.– 4 с.

86. Гавриш П. А. Термодинамические особенности взаимодействия меди и железа в сварочной ванне / П. А. Гавриш , М. А. Турчанин // Вестник ДГМА. – 2006. – № 2(4). – С.75–78.

87. Аснис Е. А. О механизме образования трещин при сварке и наплавке меди на сталь / Е. А. Аснис, В. М. Прохоренко, Л. С. Швиндлерман // Сварочное производство. 1965. – № 11. – С. 8–9.

88. Сварка меди со сталью в среде углекислого газа / Н. Г. Лосицкий, В. Я. Глушко, А. Е. Митус и др. – Химическое и нефтяное машиностроение. – 1973. – № 6.– С. 26–28.

89. Шутов Б. А. Об оптимальном составе металла шва при сварке плавлением меди с низкоуглеродистой сталью / Б. А. Шутов, А. А. Ерохин // Автоматическая сварка. – 1970.– № 11. – С. 17-19.

90. Электронно-лучевая сварка бронзы БрХО8 со сталями ЭП288 и ЭП452 / А. В. Башкатов, В. М. Плетенев, Ф. В. Самороковский и др. // В кн.:

5-я Всесоюзная конференция по электронно-лучевой сварке. Киев: Наукова думка. – 1975.– С. 180 – 182.

91. Сварка разнородных металлов и сплавов В. Р. Рябов, Д. М. Рабкин, Р. С. Курочко, Л. Г. Стрижевская. – Машиностроение, 1984 г.

92. Аснис Е. А. Особенности наплавки меди на хромоникелеевые сплавы / Е. А. Аснис, В. Н. Замков // Справочное производство. – 1961. – № 7 – С. 20 – 22.

93. Вайнерман А. Е. О влиянии проникновения медного сплава на свойства соединений, получаемых наплавкой сплавов на сталь / Вайнерман А. Е // В КН.: Наплавка металлов. Л.: ЛДНТП, 1970, ч. II, С. 25 – 35.

94. Грудзинский Б. В. О взаимодействии расплавленной меди со сталями при наплавке и сварке / Б. В. Грудзинский, И. А. Шлямнева, Г. А. Степанов // Сварочное производство. 1970. – № 12. – С. 10 – 12.

95. Рабкин Д. М. Сварка разнородних металов. / Д. М. Рабкин, В. Р. Рябов, С. М. Гуревич. – Киев: Техника, 1976. – 208 с.

96. Джевага И. И. Исследование влияния режимов наплавки и состава медных сплавов на механические свойства сталей марок Ст3, 20Х, 40Х и 40ХН. / И. И. Джевага, Г. М. Иващенко // В кн.: Сварка цветных металлов. Л.: ЛДНТП. – 1969. – С. 105 – 114.

97. Сютьев А. Н. Плазменная наплавка бронз на изделия цилиндрической формы / А. Н. Сютьев, А. Е. Вайнерман . – Л.: ЛДНТП, 1970. – 20 с.

98. Чернов В. В. Особенности сварки трением меди и ее сплавов со сталями / В. В. Чернов, Г. Г. Утлинский, Н. И. Щестопалов // в кн.: Вопросы механизации и автоматизации сварочного производства. Тула: ТПИ, – 1977. – С. 79 – 85.

99. Строение и свойства биметалла сталь + медь в широком интервале Температур / А. Н. Ростовцев, В. М. Самойлов, И. П. Кошкин и др.// В кн.: Структура и свойства ионных и металлических кристаллов. Новосибирск: Тр. Новосибирского педагогического института, – 1976. – № 126. – С. 115–127.

100. Дерибас А. А. Физика упрочненпя и сварки взрывом / А. А. Дерибас – Новосибирск: Наука. – 1972. – 188 с.

101. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка материалов. / Н. Ф. Казаков. – М.: Машиностроение, 1976. – 312 с.

102. Абрамович В. Р. Склонность коррозионностойкой стали типа 18–8 к растрескиванию при автоматической наплавке на нее меди и сплавов на медной основе в аргоне / В. Р. Абрамович, В. А. Андроник // Сварочное производство. – 1978. – № 9. – С. 11–13.

103. Абрамович В. Р. Цеклическая прочность сварных соединений меди и сплава МНЖ 5–1 со сталью ОХ18Н10Т / В. Р. Абрамович, В. Н. Захаров // Сварочное производство. – 1979. – №3. – С. 21–22.

104. Баранов А. В. Создание присадочных материалов и технологических процессов сварки и наплавки медных сплавов и разнородных металлов / А. В. Баранов, А. Е. Вайнерман, И. В. Чумакова // Вопросы материаловедения. – 2005. – №2(42). – С.148–162.

105. Чигарев В. В. Проблемы повышения качества сварки меди со сталью / В. В. Чигарев, В. А. Клюев, П. А. Гавриш // Сварочное производство в машиностроении: перспективы развития: материалы I международной научно-технической конференции, 6–9 октября, 2009г. / Под общей редакцией Н.А. Макаренко.– Краматорск : ДГМА. – 2009. – С.34.

106. Кряжков В. М. Надежность и качество сельскохозяйственной техники / В. М. Кряжков. – М.: Агропромиздат, 1989. – 335 с.

107. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя в 3-х томах / В. И. Анурьев. – М.: Машиностроение, 2001. – Т.1. – 920с.

108. Кортес А. Р. Сварка, резка, пайка металлов / Кортес А. Р. – М.: Аделант, 2007. – 192 с.

109. Петрунин И. Е. Пайка металлов / И. Е. Петрунин, С. Н. Лоцманов, Г. А. Николаєв. – М.: Металургія, 1973. – 280 с.

110. Мариненко С. Ю. Особливості паяння маловольфрамових твердих сплавів / С. Ю. Мариненко, Г. М. Крамар / Прогресивні технології і системи машинобудування. – 2014 – № 1(47). – С.196 –200.

111. Екатова А. С. Флюсы и газовые среды. Справ. / А.С. Екатова. – М.: Машиностроение, 1975. – 407 с.

112. Кузьменко А. Г. Методи розрахунків і випробувань на зношування та надійність / А. Г. Кузьменко. – Хмельницький, 2002. – 151 с.

113. Харламов Ю. А. Основы технологии восстановления и упрочнения деталей машин: Учеб. пособие в 2 т. / Ю. А. Харламов, Н. А. Будагьянц. – Луганск: Изд-во Восточноукр. нац. ун-та им. В.Даля, 2003. – . –

Т. 1. – 2003. – 496 с.

Т. 2. – 2003. – 480 с.

114. Волков С. И. Характер и причины технологических дефектов капитально отремонтированных машин / С. И. Волков // Восстановление деталей, ремонт и диагностика машин. – Калуга: Малоярославецкий филиал ГОСНИТИ. – 1977. – С. 292–297.

115. Ергучев Л. А. Магнитные методы и средства неразрушающего контроля деталей железнодорожного подвижного состава / Л. А. Ергучев. – Гомель: УО «БелГУТ», 2005. – 90 с.

116. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И. Н. Ермолов. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.

117. Васильев А. В. Тензометрирование и его применение в исследованиях тракторов / А. В. Васильев, Д. М. Раппопорт М.: Машиностроение, 1963. – 340 с.

118. Куплун А. Б. ANSYS в руках инженера / А. Б. Куплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.

119. Савуляк В. І. Мінімізація деформацій та теплових впливів у рамних конструкціях під час приварювання накладок для підсилення / В. І. Савуляк, С. А. Заболотний, Д. В. Бакалець// Наукові праці ВНТУ. – 2012. – № 4 – С.101–106.

120. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

121. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.

122. Савуляк В. І. Вплив заліковування тріщин мідними сплавами на міцність сталевих конструкцій / В. І. Савуляк, Д. В. Бакалець // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – №4. – С.172 –175.

123. Патент на корисну модель 83355 Україна, МПК B23P 6/04 (2006.01), B23K 1/00. Спосіб ремонту поверхонь рам транспортної техніки та технологічних машин, що ушкоджені тріщинами / Савуляк В.І, Заболотний С.А, Бакалець Д.В. – № u 201300304 Заявл. 09.01.2013; Опубл. 10.09.2013. Бюл. № 17 – 3с.

124. Savulyak V. I. Improvement of strengthening and repair of frame structures welding methods / V. I. Savulyak, S. A. Zabolotniy, D. V. Bakalets /Tehnomus «New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies» jornal / Romainia, 2013 – №20 – s. 189-192.

125. Савуляк В. І. Поєднання зварювання та паяння для ремонту рам транспортних засобів / В. І. Савуляк, С. А. Заболотний, Д. В. Бакалець // Проблеми трибології. – 2014. – №3(73). – С17 – 21.

126. Ляпіна. О. В. Фізико-хімічні процеси на поверхні плівок мідних сплавів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. хім. наук : спец. 01.04.18. "Фізика і хімія поверхні" / О. В. Ляпіна. – Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника. Івано-Франківськ, 2006. – 20 с.

127. Поступайло О. В. Якісні характеристики зварювання рамно-оболонкових конструкцій / О. В. Поступайло, Д. В Бакалець, В. І. Савуляк // «Наукові нотатки» міжвузівський збірник (за галузями знань «машинобудування та металообробка», «інженерна механіка», «металургія та матеріалознавство») / випуск 41 частина 2 – Луцьк, 2013 – с.121-126.

ДОДАТКИ

Додаток А

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ДП «45 ЕМЗ»
_____________ Чумак М.Ф.
«____» _____________ 2012 р.

45 експериментальний механічний завод
код 08341806
Україна м.Вінниця

АКТ

Про впровадження результатів кандидатської дисертації
Бакальця Дмитра Віталійовича
«Удосконалення процесів зміцнення та ремонту рамних конструкцій
методами зварювання»

Комісія у складі: голови комісії, головного технолога державного підприємства «45 експериментальний механічний завод» Секлюкова О.П. та членів комісії: головного конструктора Цвігуна О.Л. та начальника технічного бюро Щуся В.В. ДП «45 ЕМЗ» підтверджує, що матеріали за результатами кандидатської дисертації Бакальця Дмитра Віталійовича були впроваджені та використовувались при ремонті рамних конструкцій вантажних автомобілів, та причепів нашим підприємством. Зокрема було використано:

- розроблену технологію визначення оптимальної форми та розмірів накладок для підсилення та ремонту рамних конструкцій.
- визначені оптимальні режими та науково обґрунтовані практичні рекомендації, щодо послідовності та прийомів виконання зварних швів під час встановлення накладок.
- рекомендації, щодо режимів та послідовності термічної обробки для зменшення залишкових напружень у зварюваних конструкціях, що зміцнюються.

Використання ДП «45 ЕМЗ» запропонованої технології дало можливість ремонтувати вражені поперечними тріщинами рамні конструкції, які до цього часу вибраковувались, та підлягали заміні. Економічний ефект від використання розробки в перерахунку на одну конструкцію складає 1780 грн .

Голова комісії _____________ Секлюков О.П.
Члени комісії: _____________ Цвігун О.Л.
_____________ Щусь В.В.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор МПП «РБД-7»
__________ Сидорук Я.С.
«26» березня 2012 р.

АКТ

Про впровадження результатів кандидатської дисертації
Бакальця Дмитра Віталійовича
«Механізми утворення, діагностування та ремонту тріщин методами зварювання та споріднених технологій»

Комісія у складі: голови комісії, директора МПП «РБД-7» Сидорука Я.С. та членів комісії: головного інженера Сподарука М.А «РБД-7» та майстра дільниці Нечипорук Л.І. підтверджує, що матеріали за результатами кандидатської дисертації Бакальця Дмитра Віталійовича були впроваджені та використовувались при ремонті рамних конструкцій вантажних автомобілів, та причепів нашим підприємством. Зокрема було використано:

- розроблену технологію визначення оптимальної форми та розмірів накладок для підсилення та ремонту рамних конструкцій.
- визначені оптимальні режими та науково обґрунтовані практичні рекомендації, що до послідовності та прийомів виконання зварних швів під час встановлення накладок.
- рекомендації, що до режимів та послідовності термічної обробки для зменшення залишкових напружень у зварювальних ремонтних конструкціях.

Використання МПП «РБД-7» запропонованої технології дало можливість ремонтувати вражені поперечними тріщинами рамні конструкції, які до цього вибраковувались, та підлягали заміні. Економічний ефект від використання розробки, наприклад, для рами автомобіля ЗІЛ-133 ГЯ складає 1800 грн.

Голова комісії __________ Сидорук Я.С.
Члени комісії: __________ Сподарук М.А
__________ Нечипорук Л.І.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор з науково-педагогічної роботи по організації навчального процесу та його науково - методичного забезпечення Вінницького національного технічного університету
___________ д.т.н., проф. Романюк О.Н.
«25» ___12___ 20 14 р.

АКТ

про підтвердження впровадження результатів
кандидатської дисертації Бакальця Дмитра Віталійовича
у навчальний процес

Цим актом підтверджується, що результати кандидатської дисертації Бакальця Дмитра Віталійовича використовуються у Вінницькому національному технічному університеті під час викладання лекцій та проведення лабораторних та практичних занять:

– для підготовки фахівців за спеціальністю 7(8).07010601 – «Автомобілі та автомобільне господарство», під час викладання дисципліни «Основи технології виробництва та ремонту автомобілів» в змістовому модулі «Технологічні основи ремонту автомобілів» впроваджено методику визначення параметрів підсилюючих накладок для ремонту рамних конструкцій.

– для підготовки фахівців за спеціальністю 7(8).05050403 – «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій», під час викладання дисциплін:

«Діагностика матеріалів, конструкцій та якості покриттів» в лекціях: «Діагностика просторових рамних конструкцій» та «Інноваційні методи і технології в галузі діагностики та дефектоскопії», а також під час проведення лабораторної роботи на тему: «Кінцево-елементний аналіз, як засіб діагностування» використано запропоновану в дисертаційній роботі методику визначення розташування та розмірів ділянок рам з високою ймовірністю виникнення пошкоджень;

«Реноваційні технології зварювання» в змістових модулях: «Дефекти металоконструкцій транспортної техніки та технологічних машин» та «Технологічні особливості проведення реноваційних заходів» використано запропоновану в дисертаційній роботі технологію ремонту рам шляхом поєднання процесів зварювання та високотемпературного паяння.

Впровадження результатів дозволяє підвищити якість навчання студентів з питань забезпечення довговічності машин та їх відновлення.

Директор головного центру організаційного
та методичного забезпечення навчання — Г. Л. Лисенко

Директор ІнМТ — Ю. А. Бурєннніков

Заст. директора ІнМТ
з навчально-методичної роботи — О. В. Петров

Зав. кафедри ТПЗ — В. І. Савуляк

Додаток Б

Project

First Saved	Monday, July 02, 2012
Last Saved	Thursday, September 18, 2014
Product Version	13.0 Release

Contents

Units

TABLE 1

Unit System	Metric (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

Model (A4, B4)

Geometry

TABLE 2
Model (A4, B4) > Geometry

Object Name	*Geometry*
State	Fully Defined
Definition	
Source	H:\Ansys Vork\exp 3 ugol\KOMPAS\xt\30 gr.x_t
Type	Parasolid
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Part Color
Bounding Box	
Length X	125, mm
Length Y	85, mm
Length Z	11, mm

Properties	
Volume	85527 mm³
Mass	0,67139 kg
Scale Factor Value	1,
Statistics	
Bodies	1
Active Bodies	1
Nodes	11690
Elements	5799
Mesh Metric	None
Preferences	
Import Solid Bodies	Yes
Import Surface Bodies	Yes
Import Line Bodies	No
Parameter Processing	Yes
Personal Parameter Key	DS
CAD Attribute Transfer	No
Named Selection Processing	No
Material Properties Transfer	No
CAD Associativity	Yes
Import Coordinate Systems	No
Reader Save Part File	No
Import Using Instances	Yes
Do Smart Update	No
Attach File Via Temp File	Yes
Temporary Directory	F:\Documents and Settings\Administrator\Local Settings\Temp
Analysis Type	3-D
Mixed Import Resolution	None
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

TABLE 3
Model (A4, B4) > Geometry > Parts

Object Name	*30 gr*
State	Meshed
Graphics Properties	
Visible	Yes
Transparency	1
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Length X	125, mm
Length Y	85, mm
Length Z	11, mm
Properties	
Volume	85527 mm³
Mass	0,67139 kg
Centroid X	3,1338 mm
Centroid Y	-2,5022 mm

Centroid Z	-3,3927 mm
Moment of Inertia Ip1	409,51 kg·mm²
Moment of Inertia Ip2	867,5 kg·mm²
Moment of Inertia Ip3	1267,2 kg·mm²
Statistics	
Nodes	11690
Elements	5799
Mesh Metric	None
CAD Attributes	
PartTolerance	0,000001

Coordinate Systems

TABLE 4
Model (A4, B4) > Coordinate Systems > Coordinate System

Object Name	*Global Coordinate System*
State	Fully Defined
Definition	
Type	Cartesian
Coordinate System ID	0,
Origin	
Origin X	0, mm
Origin Y	0, mm
Origin Z	0, mm
Directional Vectors	
X Axis Data	[1, 0, 0,]
Y Axis Data	[0, 1, 0,]
Z Axis Data	[0, 0, 1,]

Mesh

TABLE 5
Model (A4, B4) > Mesh

Object Name	*Mesh*
State	Solved
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Coarse
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	1,e-001 mm
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Advanced	
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled

Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For Assembly	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
Defeaturing	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default
Statistics	
Nodes	11690
Elements	5799
Mesh Metric	None

TABLE 6
Model (A4, B4) > Mesh > Mesh Controls

Object Name	*Refinement*
State	Fully Defined
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	61 Faces
Definition	
Suppressed	No
Refinement	1

Transient Thermal (A5)

TABLE 7
Model (A4, B4) > Analysis

Object Name	*Transient Thermal (A5)*
State	Solved
Definition	
Physics Type	Thermal
Analysis Type	Transient
Solver Target	Mechanical APDL
Options	
Generate Input Only	No

TABLE 8
Model (A4, B4) > Transient Thermal (A5) > Initial Condition

Object Name	*Initial Temperature*
State	Fully Defined
Definition	
Initial Temperature	Uniform Temperature
Initial Temperature Value	22, °C

TABLE 9
Model (A4, B4) > Transient Thermal (A5) > Analysis Settings

Object Name	*Analysis Settings*
State	Fully Defined
Step Controls	
Number Of Steps	8,
Current Step Number	8,
Step End Time	31,6 s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Initial Time Step	3,95e-002 s
Minimum Time Step	3,95e-003 s
Maximum Time Step	0,395 s
Time Integration	On

Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Radiosity Controls	
Flux Convergence	1,e-004
Maximum Iteration	1000,
Solver Tolerance	0,1
Over Relaxation	0,1
Hemicube Resolution	10,
Nonlinear Controls	
Heat Convergence	Program Controlled
Temperature Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Nonlinear Formulation	Program Controlled
Output Controls	
Calculate Thermal Flux	Yes
Calculate Results At	All Time Points
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	H:\Ansys Vork\exp 3 ugol\UGOL_files\dp0\SYS-10\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	No
Solver Units	Active System
Solver Unit System	nmm

TABLE 10
Model (A4, B4) > Transient Thermal (A5) > Analysis Settings
Step-Specific "Step Controls"

Step	Step End Time
1	3,95 s
2	7,9 s
3	11,85 s
4	15,8 s
5	19,75 s
6	23,7 s
7	27,65 s
8	31,6 s

TABLE 11
Model (A4, B4) > Transient Thermal (A5) > Loads

Object Name	*Convection*	*Heat Flux*	*Convection 2*	*Heat Flux 2*	*Convection 3*
State	Fully Defined				
Scope					
Scoping Method	Geometry Selection				
Geometry	1 Face				
Definition					
Type	Convection	Heat Flux	Convection	Heat Flux	Convection
Film Coefficient	9,e-007 W/mm²·°C (step applied)		9,e-007 W/mm²·°C (step applied)		9,e-007 W/mm²·°C (step applied)
Ambient Temperature	Tabular Data		Tabular Data		Tabular Data
Suppressed	No				
Magnitude		20, W/mm² (step applied)		20, W/mm² (step applied)	

Solution (A6)

TABLE 23
Model (A4, B4) > Transient Thermal (A5) > Solution

Object Name	*Solution (A6)*
State	Solved
Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,
Information	
Status	Done

TABLE 24
Model (A4, B4) > Transient Thermal (A5) > Solution (A6) > Solution Information

Object Name	*Solution Information*
State	Solved
Solution Information	
Solution Output	Solver Output
Update Interval	2,5 s
Display Points	All

TABLE 25
Model (A4, B4) > Transient Thermal (A5) > Solution (A6) > Solution Information > Result Charts

Object Name	*Temperature - Global Maximum*	*Temperature - Global Minimum*
State	Solved	
Scope		
Scoping Method	Global Maximum	Global Minimum
Definition		
Type	Temperature	
Results		
Minimum	296,24 °C	3,928 °C
Maximum	1475,8 °C	23,852 °C

FIGURE 17
Model (A4, B4) > Transient Thermal (A5) > Solution (A6) > Solution Information > Temperature - Global Maximum

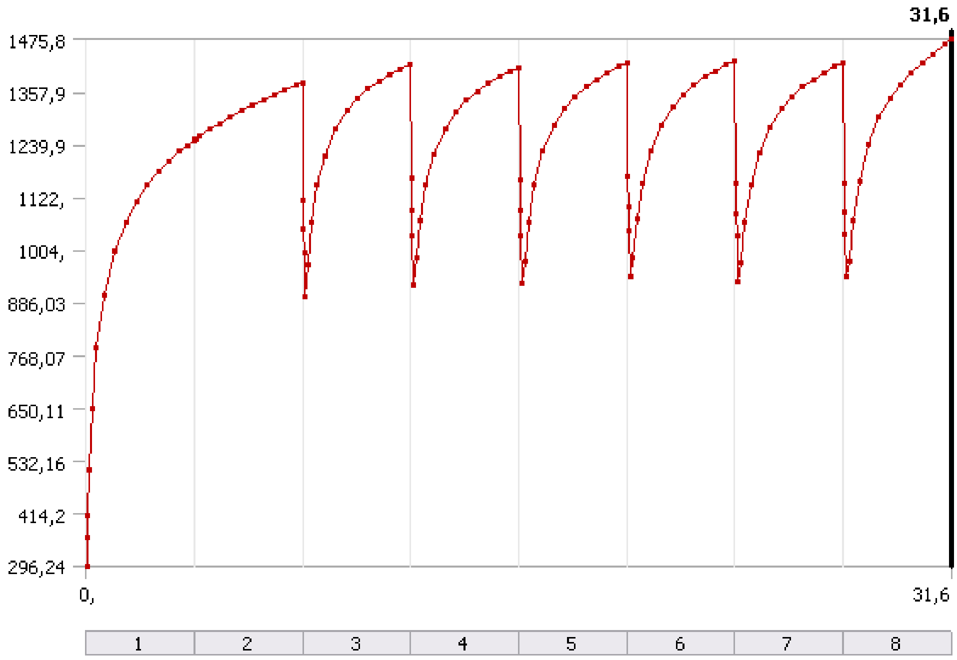


FIGURE 18
Model (A4, B4) > Transient Thermal (A5) > Solution (A6) > Solution Information > Temperature - Global Minimum

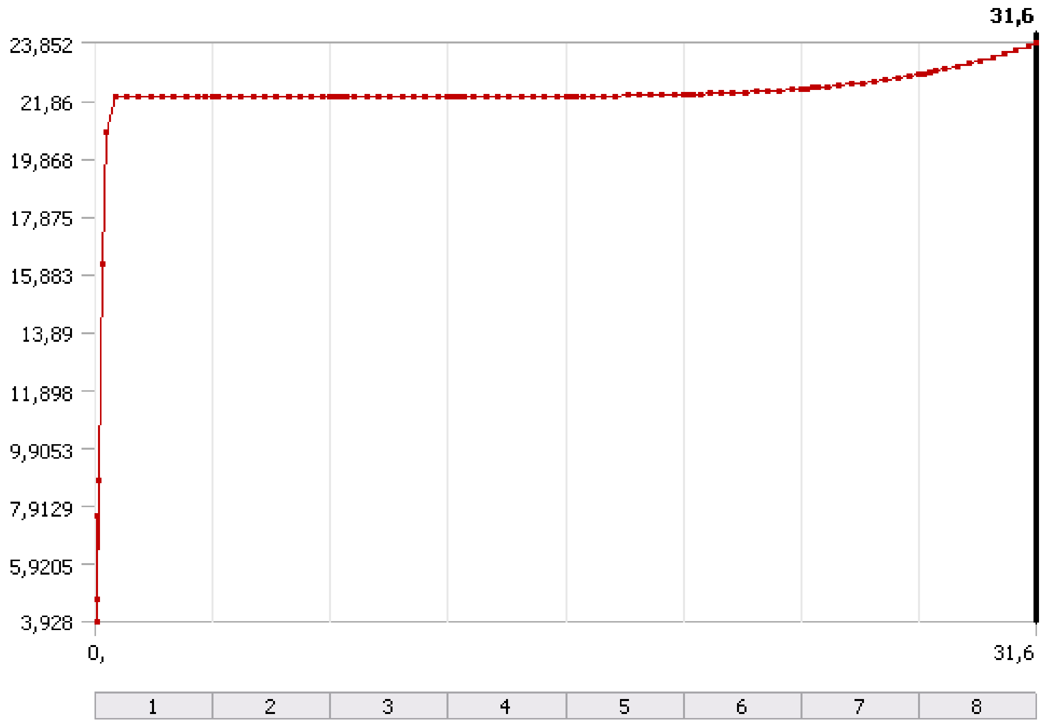


TABLE 26
Model (A4, B4) > Transient Thermal (A5) > Solution (A6) > Results

Object Name	*Temperature*
State	Solved
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Temperature
By	Time
Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Results	
Minimum	23,852 °C
Maximum	1475,8 °C
Minimum Value Over Time	
Minimum	3,928 °C
Maximum	23,852 °C
Maximum Value Over Time	
Minimum	296,24 °C
Maximum	1475,8 °C
Information	
Time	31,6 s
Load Step	8
Substep	16
Iteration Number	125

FIGURE 19
Model (A4, B4) > Transient Thermal (A5) > Solution (A6) > Temperature

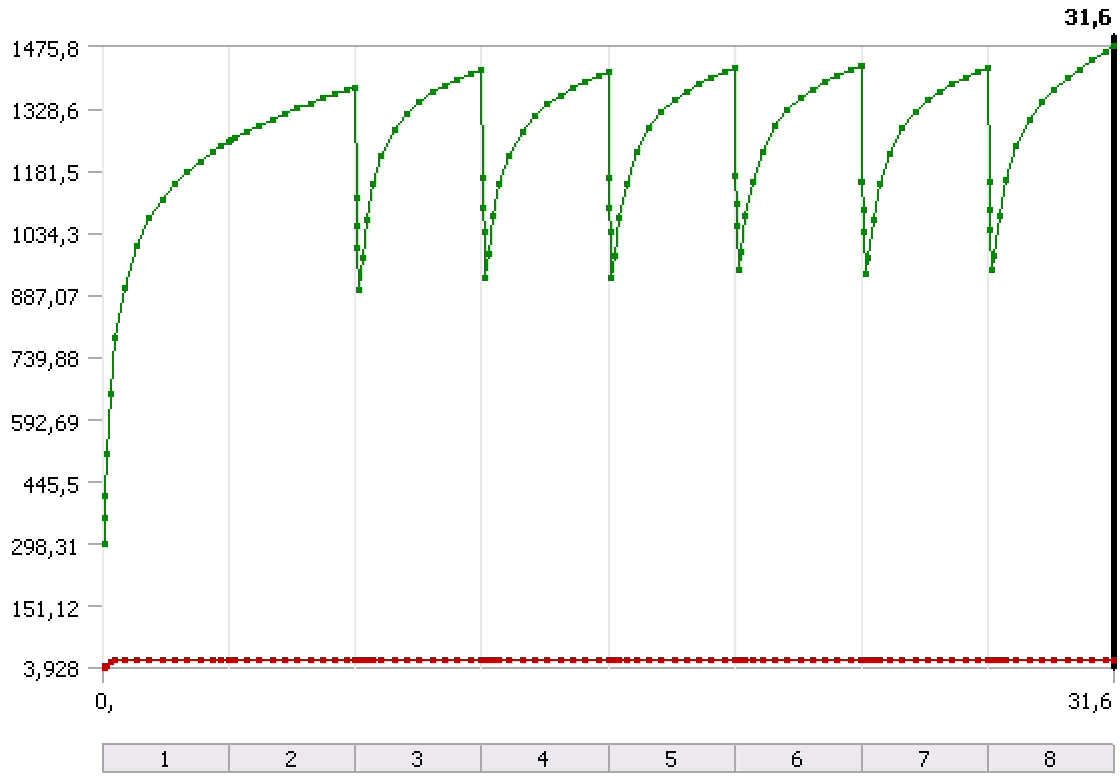
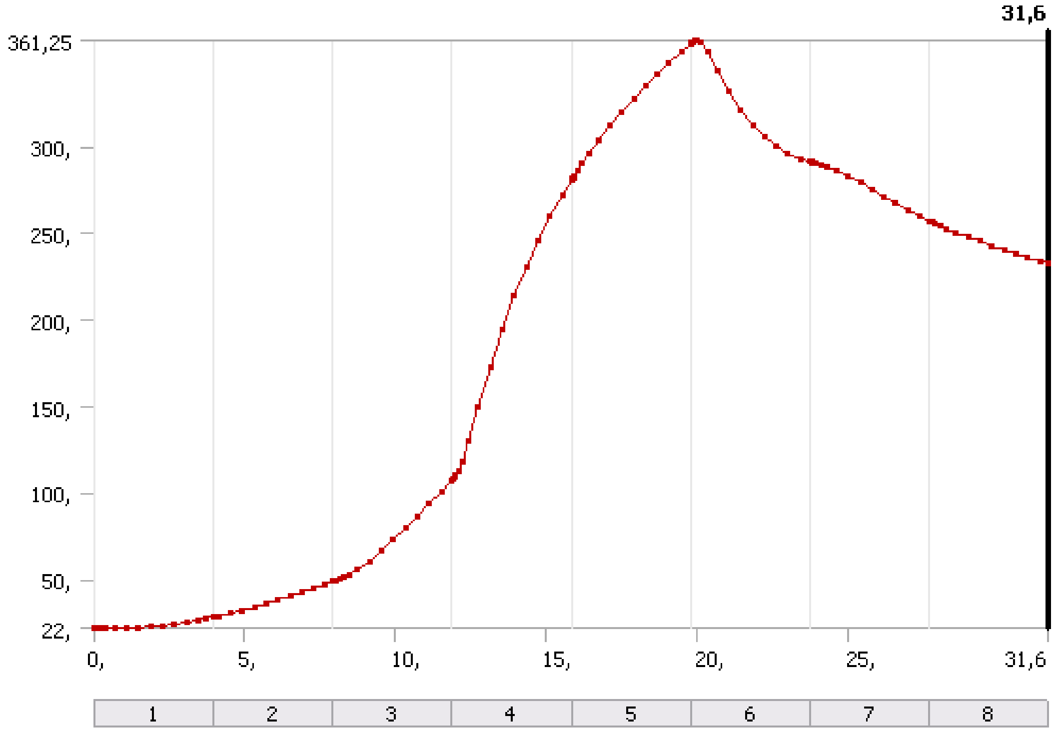


TABLE 28
Model (A4, B4) > Transient Thermal (A5) > Solution (A6) > Probes

Object Name	*Temperature Probe*	*Temperature Probe 2*	*Temperature Probe 3*	*Temperature Probe 4*	*Temperature Probe 5*
State	Solved				
Definition					
Type	Temperature				
Location Method	Geometry Selection				
Geometry	1 Vertex				
Options					
Display Time	End Time				
Spatial Resolution	Use Maximum				
Results					
Temperature	232,39 °C	197,63 °C	156,23 °C	118,91 °C	92,203 °C
Maximum Value Over Time					
Temperature	361,25 °C	209,28 °C	156,23 °C	118,91 °C	92,203 °C
Minimum Value Over Time					
Temperature	22, °C				
Information					
Time	31,6 s				
Load Step	8				
Substep	16				
Iteration Number	125				

FIGURE 20
Model (A4, B4) > Transient Thermal (A5) > Solution (A6) > Temperature Probe



Static Structural (B5)

TABLE 29
Model (A4, B4) > Analysis

Object Name	*Static Structural (B5)*
State	Solved
Definition	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Static Structural
Solver Target	Mechanical APDL
Options	
Environment Temperature	22, °C
Generate Input Only	No

TABLE 30
Model (A4, B4) > Static Structural (B5) > Analysis Settings

Object Name	*Analysis Settings*
State	Fully Defined
Step Controls	
Number Of Steps	8,
Current Step Number	8,
Step End Time	31,6 s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	Off
Inertia Relief	Off
Restart Controls	
Generate Restart Points	Program Controlled
Retain Files After Full Solve	No
Nonlinear Controls	
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled

Rotation Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Stabilization	Off
Output Controls	
Calculate Stress	Yes
Calculate Strain	Yes
Calculate Contact	No
Calculate Results At	All Time Points
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	H:\Ansys Vork\exp 3 ugol\UGOL_files\dp0\SYS-11\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	No
Solver Units	Active System
Solver Unit System	nmm

TABLE 31
Model (A4, B4) > Static Structural (B5) > Analysis Settings
Step-Specific "Step Controls"

Step	Step End Time
1	3,95 s
2	7,9 s
3	11,85 s
4	15,8 s
5	19,75 s
6	23,7 s
7	27,65 s
8	31,6 s

TABLE 32
Model (A4, B4) > Static Structural (B5) > Imported Load (Solution 1)

Object Name	*Imported Load (Solution 1)*
State	Fully Defined
Definition	
Type	Imported Data
Interpolation Type	Mechanical Results Transfer
Suppressed	No

TABLE 33
Model (A4, B4) > Static Structural (B5) > Imported Load (Solution 1) > Imported Body Temperature

Object Name	*Imported Body Temperature*
State	Solved
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Type	Imported Body Temperature
Suppressed	No
Source Environment	Transient Thermal (A5)
Display	
Active Row	1

Model (A4, B4) > Static Structural (B5) > Imported Load (Solution 1) > Imported Body Temperature

Step	Active	Source Time (s)	Analysis Time (s)
1	Yes	3,95	3,95
2	Yes	7,9	7,9
3	Yes	11,85	11,85

4	Yes	15,8	15,8
5	Yes	19,75	19,75
6	Yes	23,7	23,7
7	Yes	27,65	27,65
8	Yes	31,6	31,6

TABLE 34
Model (A4, B4) > Static Structural (B5) > Loads

Object Name	*Fixed Support*
State	Fully Defined
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Type	Fixed Support
Suppressed	No

Solution (B6)

TABLE 35
Model (A4, B4) > Static Structural (B5) > Solution

Object Name	*Solution (B6)*
State	Solved
Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,
Information	
Status	Done

TABLE 36
Model (A4, B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Solution Information

Object Name	*Solution Information*
State	Solved
Solution Information	
Solution Output	Solver Output
Newton-Raphson Residuals	0
Update Interval	2,5 s
Display Points	All

TABLE 37
Model (A4, B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Results

Object Name	*Total Deformation*	*Directional Deformation*	*Directional Deformation 2*	*Directional Deformation 3*	*Normal Elastic Strain*
State	Solved				
Scope					
Scoping Method	Geometry Selection				
Geometry	All Bodies				
Definition					
Type	Total Deformation	Directional Deformation			Normal Elastic Strain
By	Time				
Display Time	Last				
Calculate Time History	Yes				
Identifier					
Orientation		X Axis	Y Axis	Z Axis	X Axis
Coordinate System		Global Coordinate System			
Results					
Minimum	0, mm	-1,778e-002 mm	-0,20716 mm	-9,1687e-002 mm	-4,526e-003

					mm/mm
Maximum	0,24777 mm	0,20081 mm	8,4241e-002 mm	0,14942 mm	8,0829e-003 mm/mm
Minimum Value Over Time					
Minimum	0, mm	-3,1233e-002 mm	-0,20716 mm	-9,5928e-002 mm	-7,4867e-003 mm/mm
Maximum	0, mm	-1,4288e-002 mm	-6,2362e-002 mm	-7,7997e-002 mm	-4,4534e-003 mm/mm
Maximum Value Over Time					
Minimum	0,15647 mm	6,5165e-002 mm	7,3621e-002 mm	0,12304 mm	3,151e-003 mm/mm
Maximum	0,27634 mm	0,20081 mm	0,10564 mm	0,14942 mm	8,0829e-003 mm/mm
Information					
Time	31,6 s				
Load Step	8				
Substep	1				
Iteration Number	8				
Integration Point Results					
Display Option					Averaged

FIGURE 25
Model (A4, B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Total Deformation

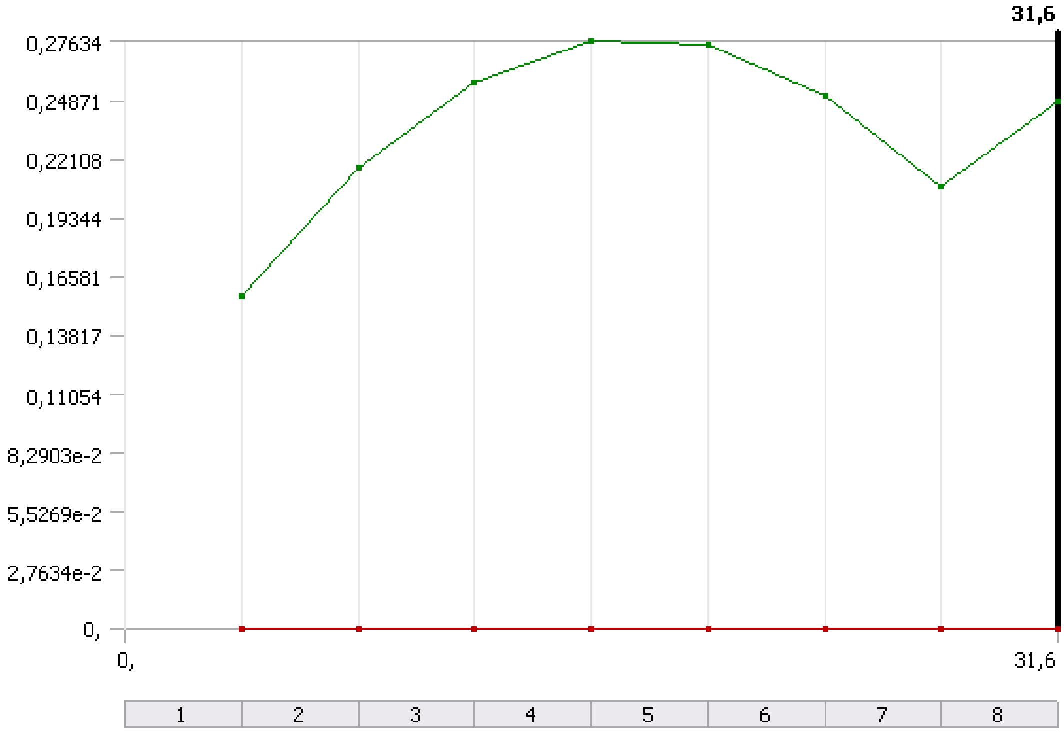


TABLE 42
Model (A4, B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Normal Elastic Strain

Time [s]	Minimum [mm/mm]	Maximum [mm/mm]
3,95	-4,4534e-003	3,7619e-003
7,9	-4,8386e-003	4,6921e-003
11,85	-5,1844e-003	3,7097e-003
15,8	-5,6821e-003	3,4092e-003
19,75	-6,2448e-003	3,151e-003
23,7	-7,4867e-003	3,6803e-003
27,65	-5,4586e-003	5,9525e-003
31,6	-4,526e-003	8,0829e-003

TABLE 43
Model (A4, B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Results

Object Name	*Normal Stress*	*Normal Stress 2*	*Normal Stress 3*
State	Solved		
Scope			
Scoping Method	Geometry Selection		
Geometry	All Bodies		
Definition			
Type	Normal Stress		
Orientation	X Axis	Y Axis	Z Axis
By	Time		
Display Time	Last		
Coordinate System	Global Coordinate System		
Calculate Time History	Yes		
Identifier			
Integration Point Results			
Display Option	Averaged		
Results			
Minimum	-1266,8 MPa	-1411,2 MPa	-759,34 MPa
Maximum	1740,8 MPa	240,17 MPa	620,07 MPa
Minimum Value Over Time			
Minimum	-1969,9 MPa	-1764,7 MPa	-876,16 MPa
Maximum	-1081,9 MPa	-1411,2 MPa	-759,34 MPa
Maximum Value Over Time			
Minimum	732,92 MPa	198,46 MPa	201,29 MPa
Maximum	1740,8 MPa	327,69 MPa	620,07 MPa
Information			
Time	31,6 s		
Load Step	8		
Substep	1		
Iteration Number	8		

FIGURE 30
Model (A4, B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Normal Stress

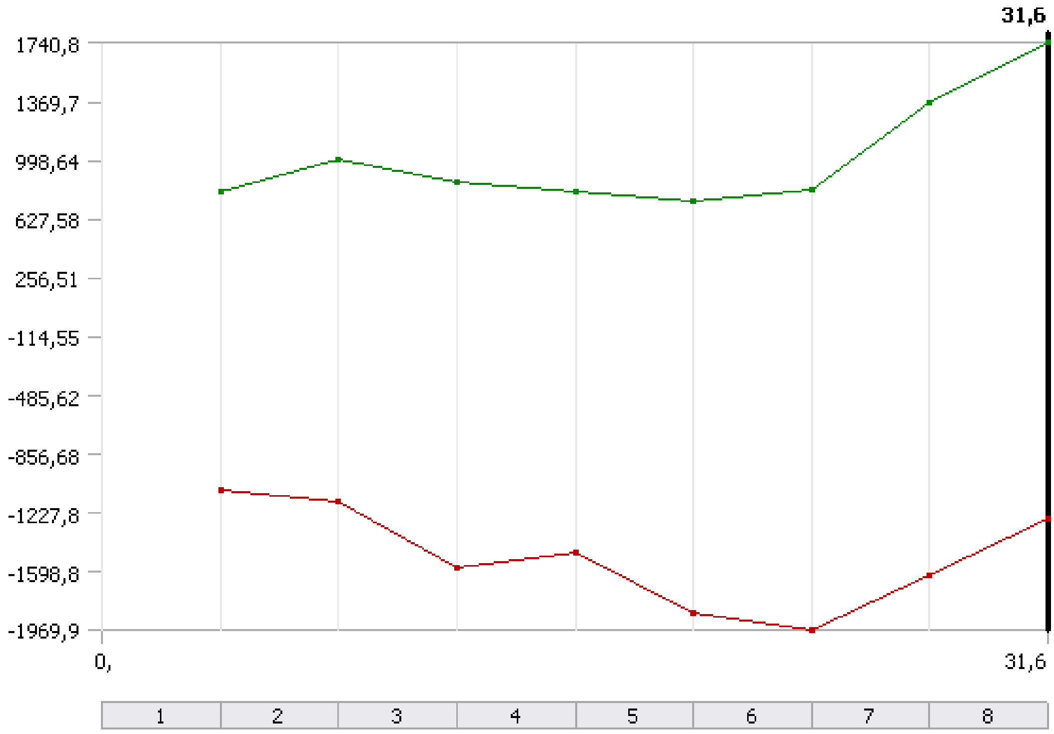
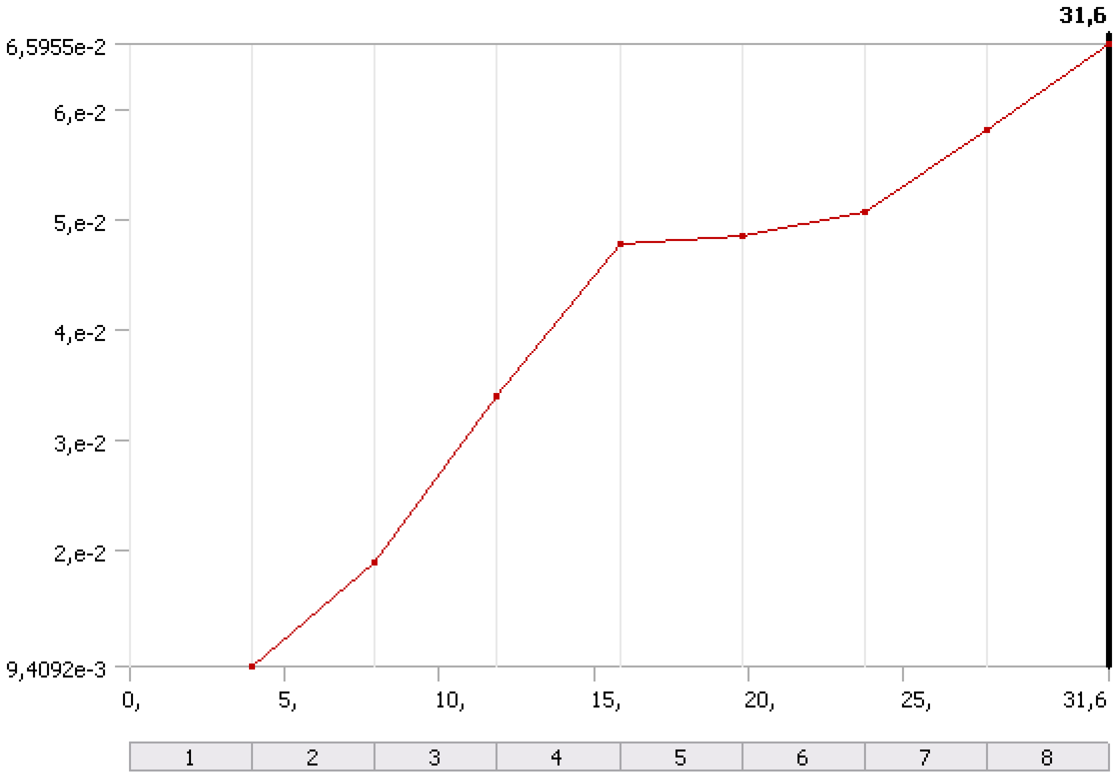


TABLE 47
Model (A4, B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Probes

Object Name	*Deformation Probe*	*Deformation Probe 2*	*Deformation Probe 3*	*Deformation Probe 4*	*Deformation Probe 5*
State	Solved				
Definition					
Type	Deformation				
Location Method	Geometry Selection				
Geometry	1 Vertex				
Options					
Result Selection	Total				
Display Time	End Time				
Spatial Resolution	Use Maximum				
Results					
Total	6,5955e-002 mm	4,8135e-002 mm	3,4169e-002 mm	2,3375e-002 mm	1,4627e-002 mm
Maximum Value Over Time					
Total	6,5955e-002 mm	4,8135e-002 mm	3,4169e-002 mm	2,3375e-002 mm	1,4627e-002 mm
Minimum Value Over Time					
Total	9,4092e-003 mm	5,3884e-003 mm	3,0713e-003 mm	1,8935e-003 mm	1,0699e-003 mm
Information					
Time	31,6 s				
Load Step	8				
Substep	1				
Iteration Number	8				

FIGURE 33
Model (A4, B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Deformation Probe



Material Data

Structural Steel

TABLE 48
Structural Steel > Constants

Density	7.85e-006 kg mm^-3
Coefficient of Thermal Expansion	1.2e-005 C^-1
Specific Heat	4.34e+005 mJ kg^-1 C^-1
Thermal Conductivity	6.05e-002 W mm^-1 C^-1
Resistivity	1.7e-004 ohm mm

TABLE 49
Structural Steel > Compressive Ultimate Strength

Compressive Ultimate Strength MPa
0

TABLE 50
Structural Steel > Compressive Yield Strength

Compressive Yield Strength MPa
250

TABLE 51
Structural Steel > Tensile Yield Strength

Tensile Yield Strength MPa
250

TABLE 52
Structural Steel > Tensile Ultimate Strength

Tensile Ultimate Strength MPa
460

TABLE 53
Structural Steel > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion

Reference Temperature C
22

TABLE 54
Structural Steel > Alternating Stress Mean Stress

Alternating Stress MPa	Cycles	Mean Stress MPa
3999	10	0
2827	20	0
1896	50	0
1413	100	0
1069	200	0
441	2000	0
262	10000	0
214	20000	0
138	1.e+005	0
114	2.e+005	0
86.2	1.e+006	0

TABLE 55
Structural Steel > Strain-Life Parameters

Strength Coefficient MPa	Strength Exponent	Ductility Coefficient	Ductility Exponent	Cyclic Strength Coefficient MPa	Cyclic Strain Hardening Exponent
920	-0.106	0.213	-0.47	1000	0.2

TABLE 56
Structural Steel > Isotropic Elasticity

Temperature C	Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus MPa	Shear Modulus MPa
	2.e+005	0.3	1.6667e+005	76923

Додаток В

Ефективність ремонту рамних конструкцій засобів транспорту

В процесі експлуатації на найбільш навантажених ділянках рамних конструкцій транспортних засобів виникають тріщини та інші пошкодження. Найпоширенішими методами усунення таких дефектів є заміна рами або її ремонт шляхом заварювання та підсилення.

Проведемо економічний аналіз доцільності заміни рами у порівнянні з ремонтом лонжеронів шляхом заварювання тріщин та наступним підсиленням різними способами.

Вартість ремонту шляхом заміни рами $C_{зам}$ визначаємо за формулою:

$$C_{зам} = C_{р} + C_{с.р.} + C_{док}, \tag{1}$$

де $C_{р}$ – ціна рами;

$C_{с.р}$ – вартість слюсарних робіт;

$C_{док}$ – вартість переоформлення в органах державної реєстрації.

Орієнтовна ціна рами автомобіля великої вантажопідємності становить 25000 грн. Середньоринкова вартість слюсарних робіт, які включають операції з очистки, вивільнення дефектної рами і установки нової з частковою заміною кріпильних елементів, становить 12652 грн. Вартість переоформлення в органах державної реєстрації становить 1536 грн.

$$C_{зам} = 25000 + 12652 + 1536 = 39188(грн).$$

Вартість ремонту рами без її заміни, що проводять шляхом усунення тріщини заварюванням та підсилення ремонтуємої ділянки рами становить:

$$C_{рем} = C_{ус.тр} + C_{підс}, \tag{2}$$

де $C_{ус.тр}$ – вартість усунення тріщини заварюванням;

$C_{підс}$ – вартість підсилення.

Вартість усунення тріщини заварюванням $C_{ус.тр}$ включає вартість таких операцій: забезпечення доступу до місця зварювання $C_{заб.д.}$; очищення та розроблення крайок тріщини $C_{розр.кр}$; заварювання тріщини $C_{зв.тр}$.

$$C_{ус.тр} = C_{заб.д} + C_{розр.кр} + C_{зв.тр}\,. \qquad (3)$$

Вартість операцій по забезпеченню доступу до місця зварювання залежить від місця знаходження ділянки з тріщиною, і може сягати 350 грн. Приймаємо $C_{заб.д.}$=350 грн.

Вартість очищення та розроблення крайок тріщини залежить від довжини тріщини $L_{тр}$ і становить 200 грн/м.п. Вартість заварювання становить 440 грн/м.п. Довжина підготовленої під зварювання тріщини становить $L_{тр}$=0,185 м.

$$C_{ус.тр} = 350 + 200 \cdot 0{,}185 + 440 \cdot 0{,}185 = 468{,}4\,(\text{грн}).$$

Підсилення ушкодженої ділянки рами виконують шляхом встановлення накладок. Форма накладки, спосіб підсилення, склад і техніка виконання основних операцій визначає ресурс відремонтованої конструкції.

Порівняємо декілька варінтів конструктивних виконань накладок для підсилення та технологій їх встановлення.

1. Підсилення ушкодженої ділянки рами виконується загальновідомими прийомами. Накладку вирізають у формі трикутника (рис.1 а), і обварють її по контуру. Ресурс рами, відремонтованої таким способом, становить $816{\times}10^6$ циклів або 35% від ресурсу нової.

2. Накладку виготовляють у вигляді паралелограма (рис.1 б) і обварюварюють її по контуру. Ресурс рами, відремонтованої таким способом, не досліджувався.

3. Виготовляють трапецевидну накладку (рис.1 в) і реалізовують запропоновану технологію зварювання з супутнім паянням. Ресурс рами,

відремонтованої таким способом, становить 1867×10^6 циклів або 79% від ресурсу нової.

Товщина стінки прокату, з якого виготовлялись накладки для підсилення, становить 5 мм.

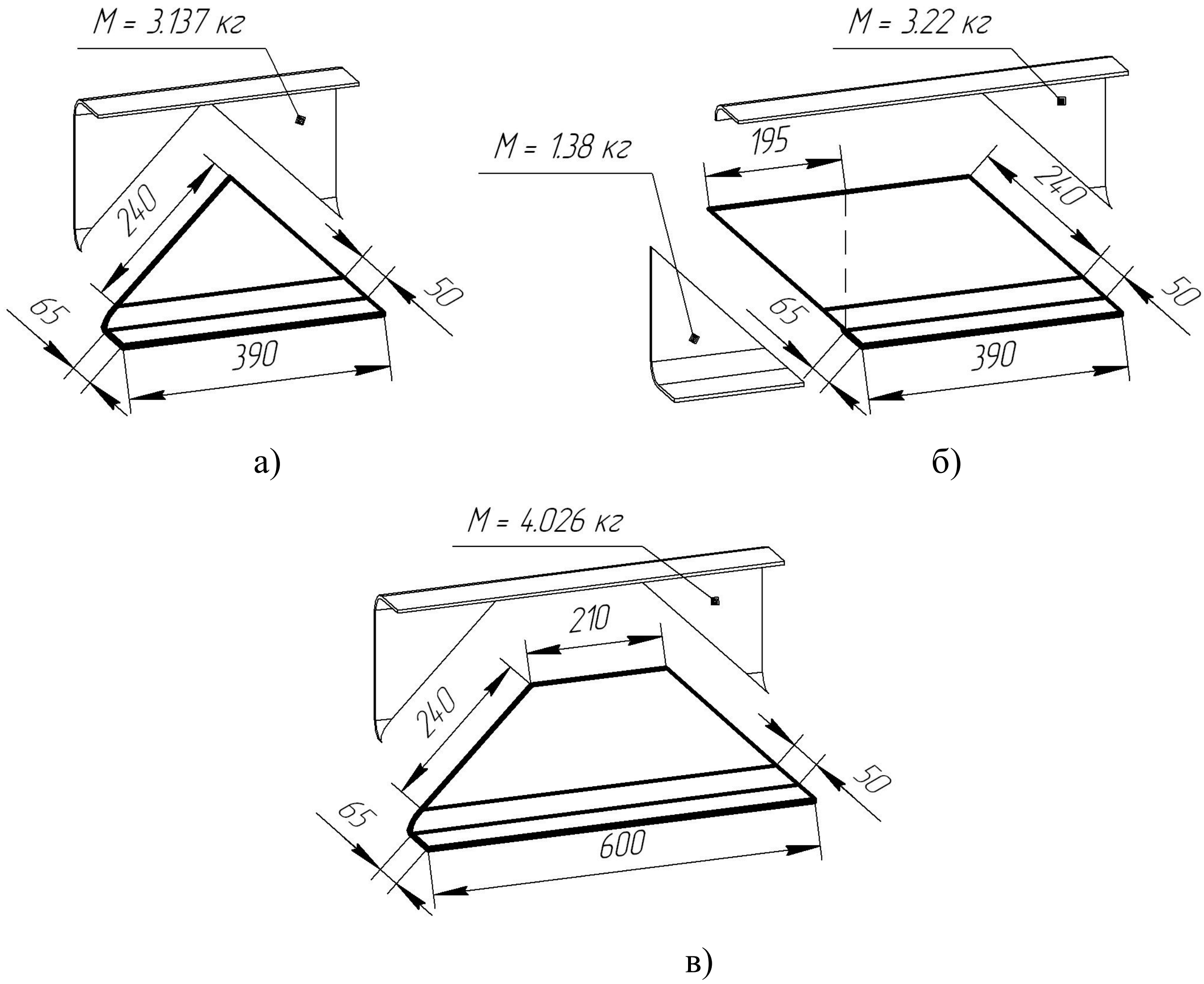


Рисунок 1.1 – Накладка для підсилення та відходи після виготовлення:

а) – у формі трикутника; б) – у формі паралелограма; в) – у формі трапеції

Проведемо порівняльний економічний аналіз описаних вище варіантів підсилення лонжерона рами, вартість яких складається з вартості накладок для підсилення і витрат на встановлення встановлення:

$$C_{підс} = C_{дет} + C_{вст}, \quad (4)$$

де $С_{дет}$ – собівартість виготовлення накладок;

$С_{вст}$ – витрати на встановлення накладки.

Виготовлення накладок для підсилення проводять шляхом вирізання з прокату.

За укрупненим методом собівартість виготовлення накладок можна обрахувати за виразом:

$$C_{дет} = C_{заг} + C_{мех} - C_{лом} + B_{н}, \tag{5}$$

де $С_{заг}$ – вартість заготовки;

$С_{мех}$ – витрати на механічну обробку;

$С_{лом}$ – вартість матеріалу (металобрухту), що залишається після механічної обробки;

$В_{н}$ – вартість накладних витрат.

Вартість заготовки, отриманої методом шляхом вирізання з прокату визначаємо за виразом:

$$C_{заг} = C_{1м} \cdot l_{заг}(грн), \tag{6}$$

де $С_{1м}$ – вартість одного метра заготовки з гнутого швеллера № 30 по ГОСТ 78281-80, становить 246.54 грн/м.п.;

$l_{заг}$ – довжина заготовки.

$$C_{заг1} = 246,54 \cdot 0,39 = 96,15(грн);$$
$$C_{заг2} = 246,54 \cdot 0,585 = 144,23(грн);$$
$$C_{заг3} = 246,54 \cdot 0,6 = 147,92(грн).$$

Витрати на механічну обробку визначаємо за виразом:

$$C_{мех} = C_{відр} + C_{оч}. \tag{7}$$

Витрати на механічну обробку включають в себе витрати на фрезерні (відрізні) $C_{відр}$ та очисні операції $C_{оч}$, що орієнтовно становлять 46 грн/м.п. і 24 грн/м.п. відповідно.

Протяжність торців, що піддаються механічній обробці, визначаємо за рис.1 і відповідно складає:

$$l_{відр1} = (0,065 + 0,05 + 0,24) \cdot 2 = 0,71(м),$$
$$l_{відр2} = (0,065 + 0,05 + 0,24) \cdot 2 + 0,39 = 1,1(м),$$
$$l_{відр3} = (0,065 + 0,05 + 0,24) \cdot 2 + 0,21 = 0,92(м),$$
$$l_{оч1} = (0,065 + 0,05 + 0,24) \cdot 2 + 0,39 = 1,1(м),$$
$$l_{оч2} = (0,065 + 0,05 + 0,24) \cdot 2 + 0,39 \cdot 2 = 1,49(м),$$
$$l_{оч3} = (0,065 + 0,05 + 0,24) \cdot 2 + 0,21 + 0,6 = 1,52(м).$$

Отже, витрати на механічну обробку складуть:

$$C_{мех1} = 0,71 \cdot 46 + 1,1 \cdot 24 = 59,06(грн);$$
$$C_{мех2} = 1,1 \cdot 46 + 1,49 \cdot 24 = 86,36(грн);$$
$$C_{мех3} = 0,92 \cdot 46 + 1,52 \cdot 24 = 78,8(грн).$$

Частина прокату, що залишається після механічної обробки, визначає масу відходів (рис.1).

Вартість матеріалу, що йде у відходи, визначаємо за виразом:

$$C_{лом1} = \frac{C_{лом1т}}{1000} \cdot M_{лом}(грн), \tag{8}$$

де $C_{лом1т}$ – вартість однієї тони лому, приймаємо $C_{лом1т}$=1600грн/т ;

$M_{лом}$ – маса лому, що отримана із всіх операцій механічної обробки.

$$C_{лом1} = \frac{1600}{1000} \cdot 3,137 = 5,02(грн),$$
$$C_{лом2} = \frac{1600}{1000} \cdot 1,38 + 3,22 = 7,36(грн),$$
$$C_{лом3} = \frac{1600}{1000} \cdot 4,026 = 6,44(грн),$$

Вартість накладних витрат включає в себе витрати на утримання та вдосконалення технологічного обладнання, утримання інженерного та допоміжного персоналу, тощо. Враховуючи складність виробництва величина накладних витрат може становити 400…500% від вартості матеріалу заготовки, що в даному випадку складе орієнтовно 350 грн.

Отже собівартість виготовлення накладки для підсилення складе:

$$C_{дет1} = 96,15 + 59,06 - 5,02 + 350 = 500,19(грн);$$
$$C_{дет2} = 144,23 + 86,36 - 7,36 + 350 = 573,23(грн);$$
$$C_{дет3} = 147,92 + 78,8 - 6,44 + 350 = 570,28(грн).$$

Встановлення накладок на ушкоджену ділянку рами.

Собівартість встановлення накладки включає: вартість витратних матеріалів $C_{в.м.}$, слюсарних $C_{с.р.}$ та зварювальних $C_{зв.р.}$ робіт:

$$C_{вст} = C_{в.м.} + C_{с.р.} + C_{зв.р.}. \qquad (9)$$

Вартість витратних матеріалів для першого та другого способу ремонту визначається масою електродного матеріалу $M_{е.м.}$ витраченого на встановлення. Вартість витратних матеріалів для третього – масою електродного $M_{е.м.}$ та паяльного матеріалу $M_{п.м.}$:

$$C_{в.м.1,2} = M_{е.м.} \cdot Ц_{е.м.}, \qquad (10)$$
$$C_{в.м.3} = M_{е.м.} \cdot Ц_{е.м.} + M_{п.м.} \cdot Ц_{п.м.}, \qquad (11)$$

де $Ц_{е.м.}$ – ринкова ціна електродного матеріалу, яка становить $Ц_{е.м}$=35грн/кг,

$Ц_{п.м.}$ – ринкова ціна паяльного матеріалу, яка становить $Ц_{п.м}$=265грн/кг,

$$M_{е.м.} = l_{зв.ш.} \cdot П_{зв}, \qquad (12)$$

де $l_{зв.ш.}$ – сумарна довжина зварних швів,

$П_{зв}$ – погонна витрата матеріалу для зварювання з катетом 5 мм, яка становить $П_{зв}$ = 0,253 кг/м.

$$M_{п.м.} = l_{зв.ш.} \cdot П_п, \qquad (13)$$

де $П_п$ – погонна витрата матеріалу для паяння, яка становить $П_п$ = 0,042 кг/м (при перерізі смужки припою на основі міді 5×1мм);

Отже, маса витратних матеріалів складає для різних варіантів ремонту:

$$M_{е.м.1} = ((0,065 + 0,05 + 0,24) \cdot 2 + 0,390) \cdot 0,253 = 0,278(кг);$$
$$M_{е.м.2} = ((0,065 + 0,05 + 0,24) \cdot 2 + 0,39 \cdot 2) \cdot 0,253 = 0,38(кг);$$
$$M_{е.м.3} = ((0,065 + 0,05 + 0,24) \cdot 2 + 0,21 + 0,6) \cdot 0,253 = 0,39(кг);$$
$$M_{п.м.} = ((0,065 + 0,05 + 0,24) \cdot 2 + 0,390 + 0,6) \cdot 0,042 = 0,072(кг).$$

Вартість витратних матеріалів за варіантами складає:

$$C_{в.м.1} = 0,278 \cdot 35 = 9,74(грн);$$
$$C_{в.м.2} = 0,38 \cdot 35 = 13,19(грн);$$
$$C_{в.м.3} = 0,39 \cdot 35 + 0,064 \cdot 265 = 30,38(грн).$$

Обсяг слюсарних робіт для обох способів встановленя елементів підсилення приблизно однаковий. Він полягає в частковому розбиранні – збиранні ремонтуємої ділянки рами її очистці і підготовці до зварювання. Закріплення накладки перед зварюванням і зачистки зварних швів після. Орієнтовна вартість слюсарних робіт становить $C_{с.р.}$ =100грн.

Оплата зварювальних робіт визначається протяжністю зварних швів:

$$C_{зв.р.} = l_{зв.ш.} \cdot Ц_{зв1м}, \qquad (14)$$

де $Ц_{зв1м}$ – ціна зварювання, яка становить $Ц_{зв1м}$ = 440 грн/м;

$$C_{зв.р.1} = 1,1 \cdot 440 = 484(грн);$$
$$C_{зв.р.2} = 1,49 \cdot 440 = 655,6(грн);$$
$$C_{зв.р.3} = 1,52 \cdot 440 = 668,8(грн).$$

Собівартість встановлення накладки складає:

$$C_{вст1} = 9,74 + 100 + 484 = 593,74(грн);$$
$$C_{вст1} = 13,19 + 100 + 655,6 = 768,79(грн);$$
$$C_{вст1} = 30,38 + 100 + 668,8 = 799,18(грн).$$

Отже собівартість підсилення ушкодженої ділянки рами шляхом встановлення накладки становить:

$$C_{підс1} = 593,74 + 500,19 = 1093,93(грн);$$
$$C_{підс2} = 768,79 + 573,23 = 1342,02(грн);$$
$$C_{підс3} = 799,18 + 570,28 = 1369,46(грн).$$

Загальна вартість ремонту рами без її заміни, що включає усунення тріщини заварюванням та підсилення ремонтуємої ділянки рами, становить:

$$C_{рем1} = 1093,93 + 468,4 = 1562,33(грн);$$
$$C_{рем2} = 1342,02 + 468,4 = 1810,42(грн);$$
$$C_{рем3} = 1369,46 + 468,4 = 1837,86(грн).$$

За отриманими значеннями порівняємо економічну доцільність ремонту розглянутими вище методами. Вартість ремонту рами автомобіля великої вантажопідємності заміною складає 39188 грн., що на порядок дорожче у порівнянні з вартістю ремонту шляхом заварювання тріщини та наступним підсиленням різними способами.

Із розрахунків також видно, що собівартість ремонту шляшом заварювання тріщини та підсилення ушкодженої ділянки рами накладкою у формі трикутника, виконаного загальновідомими прийомами нижче (1562,33 грн < 1810,42 грн < 1837,86 грн.) за собівартість підсилення накладкою у вигляді паралелограма і трапецевидною накладкою із реалізацією технології зварювання з супутнім паянням. Собівартість підсилення накладкою у вигляді паралелограма і трапецевидною накладкою приблизно однакові, але функціональний аналіз показує переваги використання трапецевидної накладки.

Попередніми дослідженнями встановлено, що від способу ремонту суттево залежить відновлений ресурс рами автомобіля. Якщо прийняти, що ресурс нової рами становить 100% (для автомобілів відчизняного виробництва близько 250000 км пробігу, іноземного –1000000 км), то відремонтованої шляшом заварювання тріщини та підсилення за першим варіантом лише 35%, а третім – 79%. При ремонті рами без заміни не виключені пошкодження на інших ділянках. Тому перераховуємо вартість усіх варіантів ремонту на 1 км пробігу, що входить до виробничої ставку пробігу (таблиця 1).

Таблиця 1 – Вартість ремонту на 1 км пробігу

Спосіб ремонту	Кількість ділянок рами з тріщиною						
	1	2	3	4	5	10	20
	Витрати на 1 км пробігу для автомобіля з ресурсом 250000 км						
Вар рем 1	0,0179	0,0357	0,0536	0,0714	0,0893	0,1786	0,3571
Вар рем 3	0,0093	0,0186	0,0279	0,0372	0,0465	0,0931	0,1861
Заміна	0,1568						
	Витрати на 1 км пробігу для автомобіля з ресурсом 1000000 км						
Вар рем 1	0,0045	0,0089	0,0134	0,0179	0,0223	0,0446	0,0893
Вар рем 3	0,0023	0,0047	0,0070	0,0093	0,0116	0,0233	0,0465
Заміна	0,0392						

За даними таблиці 1 можна зробити висновок, що ремонт рами за варіантом 3 шляхом заварювання тріщини та підсилення трапецевидною накладкою з реалізацією запропонованої технології зварювання з супутнім паянням є ефективнішим у порівнянні з іншими способами ремонту і є доцільним навіть при наявності більше 10-ти пошкоджень.