

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ**

К В А Л І Ф І К А Ц І Й Н А Р О Б О Т А

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему:

**“Дослідження міцності стикових зварних з’єднань
будівельної арматури”**

Виконав: студент VI курсу, групи Маш-62

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування

(шифр і назва)

Владислав ЯКИМЕНКО

(Ім’я та прізвище)

Керівник: к.т.н. доцент Руслан ГУМЕНЮК

(Ім’я та прізвище)

Львів 2025

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ**

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Зав. кафедри _____
(підпис)
д.т.н., професор Власовець В.М.
“28” лютого 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу студенту
Якименку Владиславу Михайловичу

1. Тема роботи: **«Дослідження міцності стикових зварних з'єднань будівельної арматури»**

Керівник роботи: Гуменюк Руслан Васильович, к.т.н., доцент

Затверджена наказом по університету від 28.02.2025 року № 140/к-с

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 08.12.2025 року

3. Вихідні дані: Літературні джерела за тематикою кваліфікаційної роботи відомих технологічних процесів виробництва та розрахунків технологічного обладнання; Матеріали навчальної, методичної довідкової та наукової літератури; Методики визначення економічної ефективності впровадження нового технологічного рішення.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

1. Стан питання, літературно-патентний пошук;

2. Методика оцінки міцності стикових зварних з'єднань арматурних стрижнів;

3. Результати дослідження міцності стикових зварних з'єднань будівельної арматури;

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях;

Висновки та пропозиції;

Бібліографічний список

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

Ілюстративний матеріал представити у вигляді презентації у застосунку Microsoft PowerPoint: Мета та завдання роботи, об'єкт дослідження; Класифікація зварних з'єднання арматурних прутків; Патентний пошук з'єднань арматурних стрижнів; Конструкції зразків і схеми їх навантажень для визначення міцності зварних з'єднань конструкційних і термонапружених сталей; Пристрій базування та закріплення для кругового заплавлення кільцевого шва та схема навантаження циліндричного зразка; Механічні характеристики зразків арматури зі сталі Ст4пс у вихідному стані; Результати випробувань зразків стикових зварних з'єднань; Експериментальні значення міцності стикових зварних з'єднань арматурних сталей; Висновки та пропозиції.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3	<i>Гуменюк Р.В., к.т.н., доц. кафедри машинобудування</i>			
4	<i>Городецький І.М., к.т.н., доцент кафедри інженерної механіки</i>			

7. Дата видачі завдання: 28.02.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1.	<i>Виконання розділу: «Стан питання, літературно-патентний пошук»</i>	<i>28.02.25- 23.04.25</i>	
2.	<i>Виконання другого розділу: «Методика оцінки міцності стикових зварних з'єднань арматурних стрижнів»</i>	<i>24.04.25- 25.06.25</i>	
3.	<i>Виконання розділу: «Результати дослідження»</i>	<i>26.06.25- 14.10.25</i>	
4.	<i>Виконання розділу: «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»</i>	<i>15.10.25- 24.11.25</i>	
5.	<i>Завершення оформлення розрахунково- пояснювальної записки. Завершення роботи в цілому</i>	<i>25.11.25- 08.12.25</i>	

Студент _____ Владислав ЯКИМЕНКО
(підпис)

Керівник роботи _____ Руслан ГУМЕНЮК
(підпис)

УДК 629.979

Дослідження міцності стикових зварних з'єднань будівельної арматури.
Якименко В.М. Кваліфікаційна робота. Кафедра машинобудування. –
Дубляни, Львівський НУВМБТ, 2025.

74 с. текст. част., 17 рис., 4 табл., 29 джерел інформації.

Виконано аналіз сучасних методів з'єднання арматури, здійснено патентний пошук технічних рішень у сфері зварних з'єднань та обґрунтовано доцільність використання автоматичного зварювання при стикуванні арматурних прутків.

Розроблено та випробувано методику виготовлення циліндричних зразків із кільцевими швами, що імітують зону стикового з'єднання.

Отримано графічні залежності між діаметром арматури та межами міцності зварних з'єднань — максимальними, середніми та мінімальними.

Встановлено, що збільшення діаметра стрижнів супроводжується незначним зменшенням міцності, проте значення залишаються в межах нормативних вимог. Загальний рівень міцності стикових з'єднань становить 550–590 Н/мм², що підтверджує достатню надійність процесу зварювання для використання у будівельних конструкціях

Проведено аналіз виробничих небезпек при роботі з зварювальним обладнанням, розроблено логіко-імітаційну модель виникнення травматизму .

ЗМІСТ

ВСТУП	7
СТАН ПИТАННЯ, ЛІТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНИЙ ПОШУК	9
1.1. Роль і значення зварювання в сучасному будівництві.....	9
1.2. Види та класифікація зварних з'єднань арматури.....	9
1.3. Матеріали для арматурних елементів і їх зварюваність.....	11
1.4. Принцип стикового контактного зварювання опором.....	12
1.5. Вплив параметрів зварювання на якість з'єднання.....	12
1.6. Зона термічного впливу і структурні зміни металу.....	13
1.7. Дефекти стикових зварних з'єднань.	13
1.8. Методи контролю якості стикових зварних з'єднань.	14
1.9. Сучасні дослідження та нормативні вимоги.	15
1.10. Патентний пошук з'єднань арматурних стрижнів.	15
2. МЕТОДИКА ОЦІНКИ МІЦНОСТІ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ АРМАТУРНИХ СТРИЖНІВ	24
2.1. Конструкції зразків і схеми їх навантажень для визначення міцності зварних з'єднань конструкційних і термонапружених сталей.....	24
2.2. Оцінка міцності стикових зварних з'єднань термонапруженої арматури	30
2.3. Методика розрахунку міцності стикових зварних з'єднань арматури.....	33
3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ БУДІВЕЛЬНОЇ АРМАТУРИ.	37
3.1. Виготовлення циліндричних зразків з кільцевою заплавною	37
3.2. Опис пристрою для кругового заплавлення кільцевого шва у циліндричному зразку	38
3.3. Експериментальні дослідження та дослідження їх результатів	42
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	51
4.1. Загальні положення.....	51
4.2. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів	55

4.3. Вимоги до організації робочого місця зварника	63
4.4. Протипожежна безпека	64
4.5. Безпека в надзвичайних ситуаціях	65
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.....	69
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	71

ВСТУП

У сучасному будівництві залізобетон є одним із найпоширеніших конструкційних матеріалів. Його міцність і довговічність значною мірою залежать від якості та надійності з'єднання арматурних стрижнів, що сприймають основні розтягувальні зусилля в елементах конструкцій. Одним із найефективніших способів з'єднання арматури є зварювання, яке забезпечує суцільність металевого зв'язку, компактність і високу несучу здатність конструкцій.

Зварні з'єднання арматури широко застосовуються під час виготовлення арматурних каркасів і сіток, монтажу збірних залізобетонних елементів, а також при ремонті та реконструкції будівельних об'єктів. Проте міцність зварного з'єднання часто є слабкою ланкою у загальній конструкції. Неправильно підібрані режими зварювання, недостатній контроль якості або невідповідність марки сталі можуть призвести до появи дефектів - непроварів, перегрівів, пористості, що знижує міцність і довговічність споруди.

Тому питання дослідження міцності стикових зварних з'єднань арматури є актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору. Від результатів таких досліджень залежить удосконалення технології зварювання, розроблення оптимальних режимів і підвищення надійності будівельних конструкцій.

Мета роботи - дослідити міцність стикових зварних з'єднань прутків будівельної арматури та визначити оптимальні параметри які забезпечують найвищі показники міцності.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

1. Проаналізувати сучасні методи стикового зварювання будівельної арматури.
2. Визначити основні фактори, що впливають на якість і міцність зварних з'єднань.

3. Провести експериментальні дослідження міцності стикових зварних з'єднань прутків будівельної арматури.

4. Розробити рекомендації щодо оптимізації технології зварювання арматури.

Об'єкт дослідження - стикові зварні з'єднання арматурних прутків будівельної арматури. Предмет дослідження - вплив технологічних режимів зварювання на міцність і структуру металу в зоні шва.

Методи дослідження: аналітичний огляд літератури, експериментальні випробування на розтяг та статистична обробка результатів.

Наукова новизна роботи полягає у визначенні закономірностей зміни міцності зварних з'єднань залежно від технологічних параметрів процесу. Практичне значення полягає в можливості використання отриманих результатів для підвищення якості зварних з'єднань арматури при виготовленні залізобетонних конструкцій.

1. СТАН ПИТАННЯ, ЛІТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНИЙ ПОШУК

1.1. Роль і значення зварювання в сучасному будівництві

Зварювання є одним із найважливіших процесів у сучасному машинобудуванні та будівництві, який забезпечує отримання нероз'ємних з'єднань високої міцності. У будівельній галузі зварювання арматури набуло особливого поширення завдяки своїй економічності, технологічності та здатності забезпечувати необхідну надійність залізобетонних конструкцій.

Залізобетон поєднує у собі властивості бетону, що добре працює на стиск, і сталі, яка ефективно сприймає розтяг. Арматурні елементи забезпечують роботу конструкцій на згин, розтяг і зсув, тому від якості з'єднань арматури залежить несуча здатність усього елемента.

Стикове зварювання дозволяє ефективно нарощувати арматурні стрижні будь-якої довжини, формувати арматурні каркаси та сітки без значного перевитрачання металу. При цьому виключається потреба у накладанні нахльостів, що зменшує витрати сталі на 10–15 % і підвищує технологічність виробництва.

1.2. Види та класифікація зварних з'єднань арматури

В практиці монолітного будівництва використовуються різноманітні види арматурних сталей, які відрізняються як за зовнішнім виглядом (рис.1.1), так і за механічними властивостями.



Рисунок 1.1 - Основні типи періодичного профілю арматури

Арматура і арматурні роботи при будівництві будівель різного призначення з монолітного залізобетону переживають в даний час революційні зміни, пов'язані з реалізацією найсучасніших досягнень науки і техніки в цій області

Зварні з'єднання арматури можна класифікувати за кількома ознаками:

1. За розташуванням елементів:
 - Стикові — з'єднання торців стрижнів в одній осі.
 - Кутові — арматурні елементи утворюють кут.
 - Таврові — один стрижень приварюється до іншого під прямим кутом.
 - Нахльостові — часткове перекриття одного стрижня іншим.
2. За видом зварювання:
 - контактне стикове (опором або оплавленням);
 - дугове ручне;
 - термічне;
 - електрошлакове;
 - механічне або холодне.
3. За розташуванням шва:
 - суцільні — без розривів по довжині;
 - переривчасті — виконані ділянками.
4. За доступом до місця зварювання:
 - однобічні;
 - двобічні.

Для арматури діаметром 10–25 мм найбільш ефективним методом визнано контактне стикове зварювання опором, що забезпечує високу якість металевого з'єднання, мінімальну зону термічного впливу та можливість автоматизації процесу.

1.3. Матеріали для арматурних елементів і їх зварюваність

Будівельна арматура в Україні виготовляється згідно з ДСТУ 3760:2019 та класифікується за класами міцності (A240, A400, A500C, A600). Для дослідження приймаємо арматуру класу A500C діаметром 12-18 мм, що є найпоширенішою у монолітному та збірному будівництві.

Хімічний склад сталі A500C (масова частка, %):

Елемент	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P
Вміст	≤ 0.25	≤ 1.5	≤ 0.6	≤ 0.3	≤ 0.3	≤ 0.05	≤ 0.05

Механічні властивості:

- границя текучості — не менше 500 МПа;
- тимчасовий опір розриву — не менше 550 МПа;
- відносне подовження — не менше 14 %;
- відношення $R_m/R_e \geq 1.08$.

Показник зварюваності

Зварюваність сталі оцінюють за вуглецевим еквівалентом:

$$C_{\text{екв}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}.$$

Для A500C $C_{\text{екв}} \approx 0.38$, що свідчить про добру зварюваність без підігріву.

На якість зварного шва впливають також:

- чистота поверхні (окалина, іржа знижують провідність);
- точність підготовки торців;
- симетричність розташування стрижнів;
- швидкість нагрівання і осадки.

1.4. Принцип стикового контактного зварювання опором

Суть процесу полягає у пропусканні через місце стику електричного струму великої сили (до 20–40 кА) при невеликій напрузі (1–2 В). Опір на контактній поверхні викликає локальне нагрівання металу до 1100–1300 °С. Після досягнення пластичного стану струм вимикається, і на деталі прикладається осьове зусилля осадки (100–200 Н/мм²). Унаслідок тиску відбувається змішування розігрітого металу і формування суцільного металевого зв'язку.

Основні етапи процесу:

1. Попереднє притискання торців — забезпечення електричного контакту.
2. Нагрівання струмом — короткочасне оплавлення контактної поверхні.
3. Осадка — пластичне з'єднання розігрітих частин під тиском.
4. Охолодження — стабілізація структури металу.

Тривалість усього циклу — 1–3 с. Найкращі результати досягаються при забезпеченні симетрії, чистоти контактів і точного дозування параметрів струму та тиску.

1.5. Вплив параметрів зварювання на якість з'єднання

Параметри, що визначають якість стикового зварювання:

- Сила струму (I), кА;
- Тиск осадки (P), МПа;
- Час нагрівання (t), с;
- Площа контакту торців (F), мм².

Надмірна сила струму викликає перегрів, утворення оксидів і пір, тоді як недостатня - призводить до непровару. Оптимальний тиск осадки повинен

забезпечувати витіснення розплавлених оксидів і щільне з'єднання без значного деформування профілю.

Емпірично визначено, що для сталі A500C Ø14 мм найкращі результати дають такі параметри:

- струм 25–30 кА;
- тиск осадки 150–180 МПа;
- час нагріву 1.2–1.6 с.

При дотриманні цих режимів зварне з'єднання витримує розтягне навантаження не менше 95–100 % від міцності суцільного стрижня.

1.6. Зона термічного впливу і структурні зміни металу

У процесі зварювання структура металу в зоні шва зазнає суттєвих змін.

Виділяють три основні області:

1. Метал шва — повністю розплавлений і закристалізований.
2. Зона термічного впливу (ЗТВ) - ділянка, де структура змінена, але плавлення не відбулося.
3. Основний метал - не підданий термічному впливу.

У ЗТВ спостерігаються такі явища:

- зростання зерна при перегріві;
- часткове розчинення карбідів;
- можливе зниження пластичності через охолодження.

Оптимальний режим повинен забезпечити мінімальну ширину ЗТВ (до 2–3 мм) і рівномірний перехід до основного металу без концентрації напружень.

1.7. Дефекти стикових зварних з'єднань

Основні види дефектів:

- Непровар — часткове відсутність сплавлення металу.
- Пори — газові включення через бруд або вологу.
- Перегрів і підпал — надлишковий струм.
- Тріщини — результат внутрішніх напружень при швидкому охолодженні.
- Зміщення осей стрижнів — неправильне встановлення в затискачах.

Кожен із цих дефектів може зменшити міцність з'єднання на 10–40 %. Особливо небезпечні поздовжні тріщини та непровари, які знижують опір розтягуванню.

1.8. Методи контролю якості стикових зварних з'єднань

Контроль зварних з'єднань виконується відповідно до ДСТУ EN ISO 17660-1:2018.

Застосовуються такі методи:

1. Візуальний і вимірювальний контроль — перевіряють співвісність, діаметр, наявність напливів.
2. Механічні випробування:
 - розтяг зразка (ДСТУ EN ISO 6892-1);
 - згин під заданим кутом;
 - ударна в'язкість (за необхідності).
3. Неруйнівний контроль:
 - ультразвуковий — для виявлення непроварів і тріщин;
 - рентгенографічний — для аналізу внутрішніх дефектів;
 - магнітопорошковий — для сталей феритного класу.

Для зварних арматурних каркасів передбачено вибірковий контроль — не менше 1 % від загальної кількості з'єднань.

1.9. Сучасні дослідження та нормативні вимоги

Згідно з європейськими стандартами EN ISO 17660-1, EN 10080, а також українськими ДБН В.2.6-98:2009, якість стикового зварювання арматури повинна забезпечувати не менше $0.9 \sigma_m$ основного металу при випробуванні на розтяг.

Останні дослідження, проведені в НДІ будівельних конструкцій, показали, що при оптимізації струму і тиску осадки можна підвищити міцність стикового з'єднання до 100–105 % від міцності арматури. Додаткове легування шва кремнієм або використання контролю нагріву струмом змінної частоти також підвищує стабільність процесу.

1.10 Патентний пошук з'єднань арматурних стрижнів

Патентний пошук виконується з метою виявлення існуючих технічних рішень у галузі стикового зварювання арматури, визначення рівня техніки, ступеня новизни та можливих напрямів удосконалення технології. Результати пошуку дозволяють уникнути дублювання відомих розробок, встановити новизну запропонованих технічних рішень та обґрунтувати доцільність подальших досліджень.

Завдання патентного пошуку:

- виявити відомі способи і пристрої для стикового зварювання арматури;
- визначити технічні недоліки існуючих рішень;
- оцінити можливість удосконалення технології зварювання для підвищення міцності з'єднань.

Джерела інформації та методика пошуку

Пошук здійснювався за відкритими базами даних:

- Espacenet (European Patent Office) -
<https://worldwide.espacenet.com;>

□ WIPO (World Intellectual Property Organization) -
<https://patentscope.wipo.int>;

□ База Укрпатенту - <https://sis.ukrpatent.org>;

□ Google Patents - <https://patents.google.com>.

Ключові слова пошуку: *“butt welding reinforcement”, “contact butt welding rebar”, “зварювання арматури”, “стикове зварювання арматурних стрижнів”*.

Пошук охоплював період 2000–2025 рр. у класах Міжнародної патентної класифікації:

□ B23K 11/00 — зварювання оплавленням або тиском;

□ B23K 35/00 — матеріали для зварювання;

□ E04C 5/06 — арматурні вироби для бетону.

Аналіз виявлених патентів

Патент 1 — UA 93748 U (Україна)

Назва: Пристрій для стикового зварювання арматури

Опис: У конструкції передбачено механізм самовстановлення стрижнів, що забезпечує автоматичне центрування арматури перед зварюванням.
Переваги: підвищується співвісність, зменшуються непровари.

Недоліки: складність конструкції затискачів, обмеження по діаметрах до 20 мм.

Патент 2 — CN 108912547 (Китай)

Назва: Автоматизована установка для зварювання арматури великого діаметра

Опис: Передбачає комп’ютерне регулювання струму й тиску осадки.

Переваги: висока повторюваність режимів, можливість зварювання Ø до 40 мм.

Недоліки: висока вартість обладнання.

Патент 3 — UA 142365 U (Україна)

Назва: Спосіб підвищення міцності стикових з'єднань арматури

Опис: Використання імпульсного зварювального струму з регульованою частотою 50–200 Гц.

Переваги: рівномірний нагрів, мінімальна зона термічного впливу.

Недоліки: потребує модернізованих джерел живлення.

Патент 4 — WO 2021/234567 (WIPO)

Назва: Method for quality control of welded reinforcement joints

Опис: Безконтактна система ультразвукової діагностики зварних стиків арматури.

Переваги: повна автоматизація контролю, висока точність.

Недоліки: складне програмне забезпечення.

Узагальнення результатів патентного пошуку

Аналіз показав, що сучасні розробки спрямовані на:

- підвищення точності центрування арматурних стрижнів;
- удосконалення електричних режимів (імпульсне або регульоване живлення);
- автоматизацію процесу контролю якості зварних з'єднань.

Разом з тим, проблема забезпечення стабільної міцності при зміні діаметра арматури та складу сталі залишається актуальною. Більшість рішень не враховують впливу мікроструктурних змін металу при короткочасному нагріві, що може стати предметом подальших досліджень.

Винахід (рис. 1.2) належить до галузі зварювального виробництва й може застосовуватись під час виготовлення товстостінних циліндричних обичайок із поздовжніми швами. Відомий технологічний процес передбачає, що після виконання зварювання зварний шов і навколошовну ділянку піддають прокатуванню роликами спеціальної прокатної установки. У результаті прокатування в металі виникають пластичні деформації, які за напрямом протилежні напруженням, що утворилися під час зварювання,

завдяки чому зменшуються залишкові деформації та підвищується точність виготовленої конструкції.

Разом з тим, недоліком такого методу є обмеженість його застосування. Процес ефективний лише для металу порівняно невеликої товщини (до 12–16 мм). Під час обробки товстих листів використання роликів із плоскою робочою поверхнею стає малоефективним, оскільки вимагає значних зусиль деформування, що ускладнює як конструкцію прокатного пристрою, так і сам технологічний процес обробки звареної деталі.

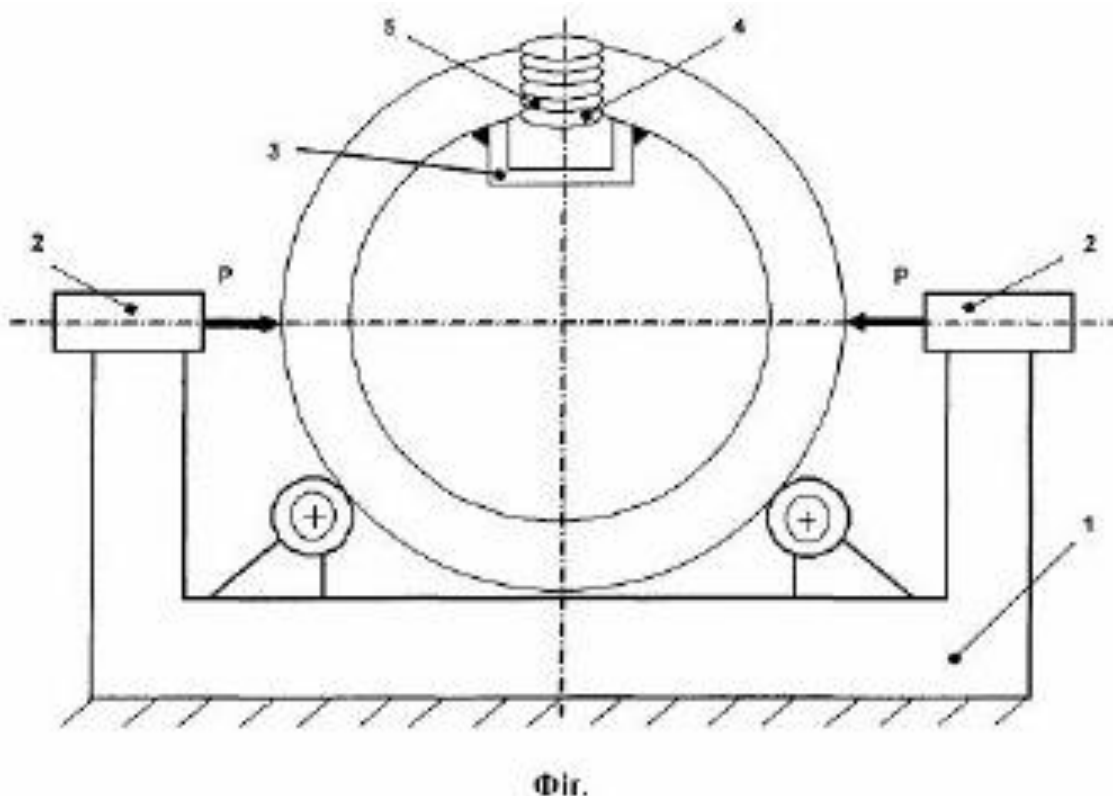


Рисунок 1.2 - Спосіб багатопрохідного дугового зварювання поздовжніх стиків товстостінних циліндричних обичайок

Номер патенту: UA 67052

Дата публікації: 15.06.2004 р.

Винахід належить до галузі зварювального виробництва і призначений для з'єднання товстостінних циліндричних обичайок з подовжніми швами при виготовленні корпусних деталей, резервуарів, котлів або трубопроводів підвищеного тиску.

Сутність способу полягає у виконанні багатопрохідного дугового зварювання стиків з попереднім складанням елементів під зварювання, після чого проводять послідовне заповнення розробки стику окремими шарами зварного металу.

Особливістю є те, що після виконання кожного шару здійснюється його прокатування спеціальним роликком із клиноподібною робочою поверхнею.

Такий ролик створює зусилля стиснення, що формують пластичні деформації у наплавленому металі, напрям яких протилежний зварювальним деформаціям.

Завдяки цьому компенсуються залишкові напруження, зменшуються кутові викривлення і забезпечується висока точність та рівність шва.

Основною перевагою способу є можливість ефективного зниження деформацій при зварюванні масивних конструкцій, де звичайні методи термообробки менш ефективні.

Однак головним недоліком даного рішення є обмеження за товщиною металу: при малих кутах розкриття кромки (кілька градусів) і малому зазорі (до 12–30 мм) ролик може бути застосований лише для обичайок середньої товщини (приблизно 20–80 мм).

При більш значних товщинах різко зростають зусилля деформації, що ускладнює конструкцію прокатного вузла та технологію обробки.

Таким чином, даний спосіб є ефективним для зварювання середньо- та великогабаритних корпусів, але має технологічні обмеження для дуже товстих деталей.

Спосіб стикового з'єднання термомеханічно зміцненої арматури рис 1.8 (аналогічна конструкція застосовується при монтажі залізобетонних каркасів підвищеної сейсмостійкості)

Цей винахід належить до зварювальних технологій арматурних каркасів і може бути використаний у будівництві сейсмонебезпечних споруд, мостів та висотних будівель.

Сутність полягає у стиковому з'єднанні кінців арматурних стрижнів, на які накладають парні накладки (гільзи), що з'єднуються з основним металом зварними швами.

На відміну від традиційних методів, тут застосовуються накладки меншого перерізу, ніж діаметр основного стрижня.

Таке конструктивне рішення забезпечує низку переваг:

- ☐ підвищується сейсмостійкість залізобетонних елементів завдяки більш рівномірному розподілу напружень у зоні стику;
- ☐ зменшуються концентратори напружень, що позитивно впливає на довговічність зварного з'єднання;
- ☐ скорочується матеріалоемність за рахунок меншої маси накладок;
- ☐ забезпечується вища надійність та ремонтпридатність стику.

У процесі зварювання кінці арматурних стрижнів фіксуються у пристосуванні, а накладки накладаються з обох боків стику.

Після зварювання шви проходять контроль візуальним і ультразвуковим методом.

Отримане з'єднання здатне сприймати як осьові, так і поперечні навантаження без зниження міцності.

Винахід належить до галузі зварювального виробництва та будівельного машинобудування і може бути використаний при з'єднанні термомеханічно зміцненої арматури у залізобетонних конструкціях, зокрема в каркасах будівель підвищеної сейсмостійкості, мостах, колонах та інших відповідальних спорудах.

Суть способу полягає у тому, що на кінці арматурних стрижнів накладаються парні накладки, які з'єднують із торцями арматури зварними швами. На відміну від відомих аналогів, у даному способі застосовують накладки з перетином меншим, ніж перетин основних стрижнів, що дає можливість оптимізувати розподіл напружень у зоні стику та зменшити концентрацію напружень у місцях початку шва.

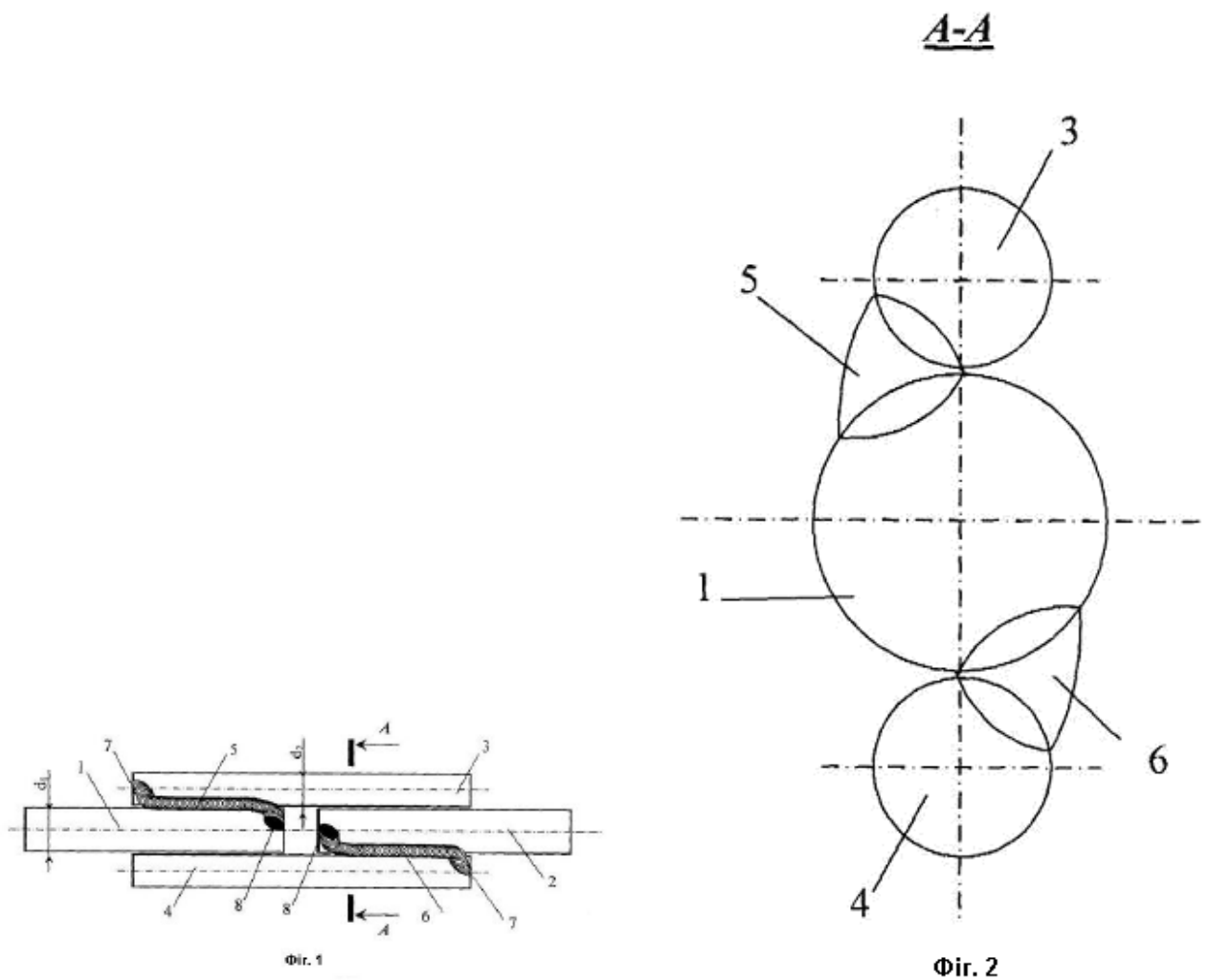


Рисунок 1.3 - Спосіб стикового з'єднання термомеханічно зміцненої арматури.

Номер патенту: UA 62282

Дата публікації: 25.08.2011 р.

Під час виконання з'єднання початок зварного шва формують на початку накладки, а його закінчення виводять на кінець арматурного стрижня. Таке виконання забезпечує плавний перехід металу між накладкою та основним стрижнем, що сприяє зменшенню локальних зон перегріву й підвищенню довговічності стику.

Особливістю конструкції є також те, що сумарна площа поперечного перерізу накладок становить не менше ніж 1,5 площі перерізу арматурного

стрижня, що гарантує достатній запас міцності з'єднання при дії розтягувальних і згинальних навантажень.

Перед виконанням зварювання проводять попередній підігрів арматури та накладок до температури близько 100 °С, що зменшує температурні градієнти та ризик утворення холодних тріщин у шві. Зварювання здійснюють електродами діаметром не більше 3 мм із основним покриттям типу В, що забезпечує стабільну дугу, глибоке проплавлення і високу чистоту металу шва.

У випадку багатошарового зварного шва наступний шар накладають лише після того, як температура попереднього охолоне до 100 °С або нижче. Такий температурний режим дозволяє уникнути перегріву металу, запобігає утворенню внутрішніх напружень та забезпечує плавну структуру металу шва без зон перегріву й крихкого руйнування.

Переваги запропонованого способу

1. Підвищення сейсмостійкості залізобетонних каркасів завдяки рівномірному розподілу напружень у зоні стику.
2. Зменшення концентрації напружень у зонах початку і закінчення шва, що підвищує надійність та довговічність з'єднання.
3. Оптимізація матеріалоємності — завдяки використанню накладок меншого перерізу, маса стику знижується без втрати міцності.
4. Покращення структури зварного металу завдяки попередньому підігріву та контролю температурного циклу між шарами.
5. Забезпечення високої якості швів при використанні електродів малого діаметра та основного покриття.

Аналіз і порівняльна оцінка

Порівняння двох описаних рішень (рис. 1.2 і рис. 1.3) показує, що обидва способи спрямовані на зменшення зварювальних деформацій і підвищення надійності з'єднання. Якщо у випадку патенту №67052 основна увага приділяється термомеханічному впливу на метал шва після зварювання,

то у способі стикового з'єднання арматури головний ефект досягається оптимізацією геометрії стику та раціональним розподілом напружень.

Обидва підходи мають спільну мету — підвищення міцності, точності та довговічності з'єднань, однак реалізують її різними технічними засобами:

- прокатування зварних шарів роликотом з клиноподібною поверхнею — для компенсації зварювальних напружень (машинобудівна технологія);
- застосування парних накладок з меншим перерізом — для зміцнення арматурного стику (будівельна технологія).

Висновки до розділу

□ Практика експлуатації деталей та елементів залізобетонних конструкцій показує, що при тривалому статичному навантаженні вони поступово втрачають свою працездатність і можуть руйнуватися внаслідок зниження фізико-механічних властивостей матеріалу. До основних причин цього явища належать залишкові напруження, що виникають у стрижнях арматури після попереднього деформування, а також вплив температурних змін, динамічних і ударних навантажень. Тому для забезпечення надійності конструкцій необхідно здійснювати комплексне дослідження їх міцності та довговічності з урахуванням усіх зазначених факторів.

□ Аналіз причин руйнування конструкційних матеріалів свідчить, що найбільш небезпечними зонами є ділянки з концентраторами напружень і області, де спостерігається зниження пластичності або міцності матеріалу. Особливо це характерно для термонапружених арматурних прутків у залізобетонних елементах, а також для стикових зварних з'єднань, які під час експлуатації зазнають значних навантажень і температурних впливів. Це обумовлює необхідність удосконалення методів контролю та оцінки міцності таких елементів.

2. МЕТОДИКА ОЦІНКИ МІЦНОСТІ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ АРМАТУРНИХ СТРИЖНІВ

Оцінка міцності зварних з'єднань є ключовим етапом перевірки якості та надійності арматурних каркасів і конструкцій. Метою даного розділу є розроблення та обґрунтування методики випробувань стикових зварних з'єднань арматури класу А500С, виконаних методом контактного стикового зварювання опором, для визначення їхньої міцності на розтяг і встановлення впливу технологічних параметрів на результати.

2.1 Конструкції зразків і схеми їх навантажень для визначення міцності зварних з'єднань конструкційних і термонапружених сталей

Для проведення досліджень стикових зварних з'єднань, особливо у випадках, коли необхідно оцінити опір руйнуванню самого зварного шва або перехідних зон з неоднорідними властивостями матеріалу, у наукових роботах [3, 7, 13, 17, 20] запропоновано використовувати зразки типу пластин, з'єднаних стиковими швами різних конфігурацій. Такі зразки виготовляються у вигляді прямокутних пластин з Х-подібними, V-подібними, косими або шевронними обробками крайок, при цьому між деталями можуть бути виконані м'які або тверді прошарки (рис. 2.1). Ці варіанти з'єднань дозволяють досліджувати вплив геометрії шва, типу підкладки та жорсткості прошарку на стійкість матеріалу до розвитку тріщин при статичних і циклічних навантаженнях.

Окрім того, для визначення міцності зварних з'єднань у циліндричних деталях були розроблені спеціальні схеми випробувань, які імітують реальні умови роботи елементів конструкцій, що зазнають розтягувальних і згинальних напружень. Такі методики подано в роботах авторів [14, 22], де запропоновано застосовувати моделі стикових з'єднань із центральним швом,

розташованим уздовж осі циліндричного зразка (рис. 2.1). Ці схеми дозволяють оцінити поведінку зварного шва в умовах просторового напруженого стану, а також виявити закономірності утворення і розвитку тріщин при різних режимах навантаження.

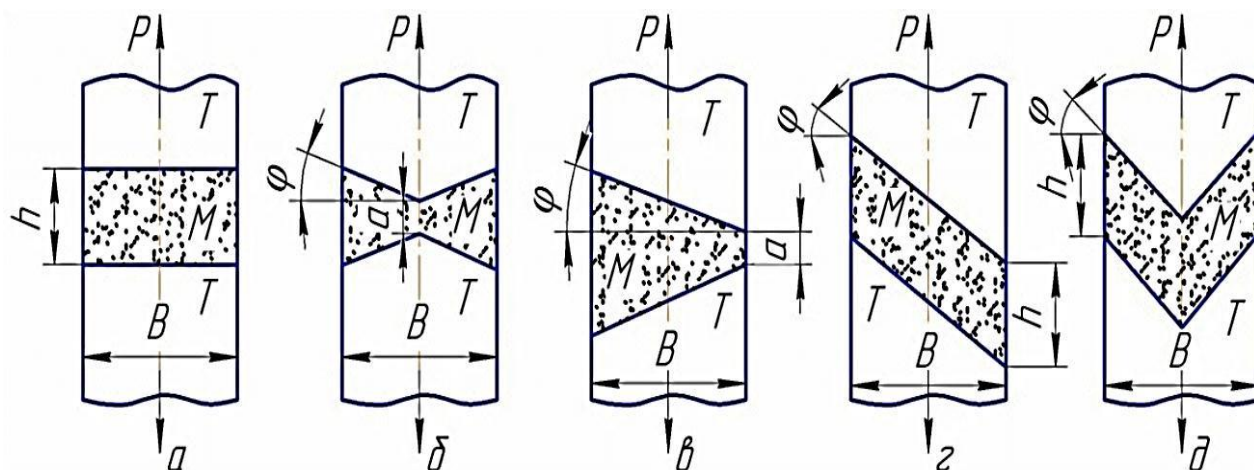


Рисунок 2.1 - Схеми виконання стикових зварних з'єднань із різною конфігурацією прошарків: а, б, в, г, д – відповідно із прямолінійним, Х-подібним, V-подібним, похилим та шевронним типами оброблення крайок.

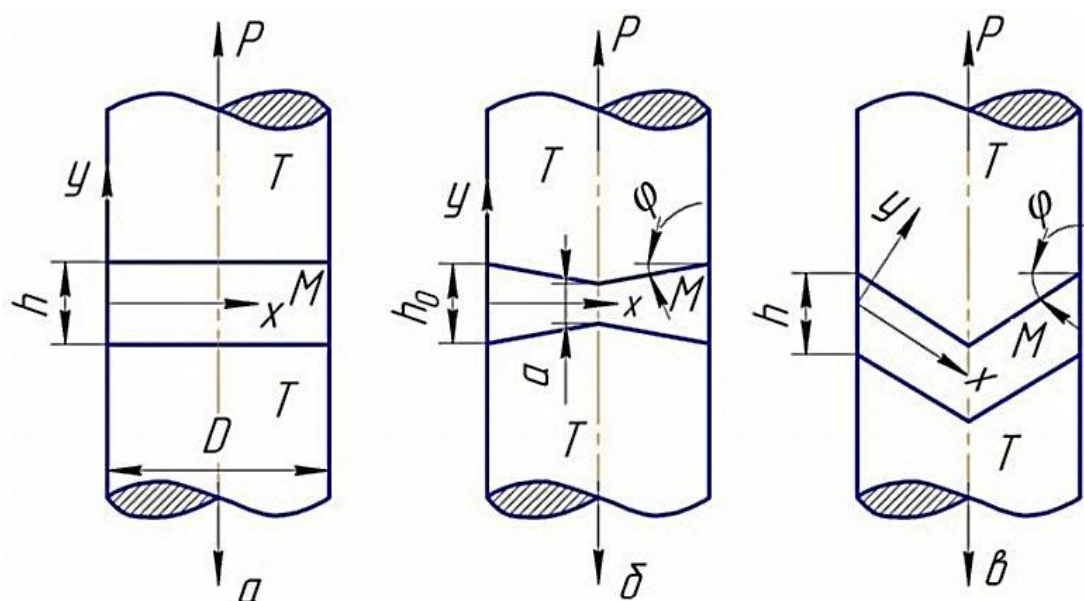


Рисунок 2.2 - Типові схеми осьового розтягування циліндричних стикових зварних з'єднань із різною геометрією прошарку: а – прямокутний; б – Х-подібний; в – шевронний варіант з'єднання..

На наведених схемах (рис. 2.1 та рис. 2.2) застосовано такі умовні позначення: h — товщина прошарку; T — тверда основа; M — м'який

прошарок; В — ширина пластини; D — діаметр циліндричного зразка; φ — кут нахилу прошарку.

Слід зазначити, що співвідношення між міцністю основного металу та міцністю металу шва визначає ступінь механічної неоднорідності зварного з'єднання. Цей параметр характеризується коефіцієнтом неоднорідності який, за результатами досліджень, зазвичай знаходиться у межах 1,5–1,6.

$$K_B = \frac{\sigma_B^0}{\sigma_B^{\text{ш}}},$$

Величина цього коефіцієнта змінюється залежно від товщини зварюваних елементів, типу підготовки кромek, режиму зварювання, а також від після зварювальної термічної обробки.

У прошарках завтовшки h виконують концентратор напружень із граничною гостротою $\rho \leq 0,1$ мм, який використовується для ініціювання тріщини під час експерименту (на схемах рис. 2.1 та 2.2 цей елемент умовно не показано).

Типову конструкцію компактного зразка з боковим концентратором для випробування металу шва за схемою позацентрового розтягу запропоновано в роботах авторів [5] (рис. 2.3). Ця схема дозволяє найбільш повно відтворити реальний напружено-деформований стан зварного шва під час експлуатації та забезпечує достовірність отриманих результатів.

Дана конструкція зразка призначена для оцінки опору розвитку тріщини в зоні шва під час позацентрового навантаження. Завдяки наявності радіусного переходу та контрольованої геометрії шва забезпечується рівномірний розподіл напружень і можливість визначення реального значення у лабораторних умовах.

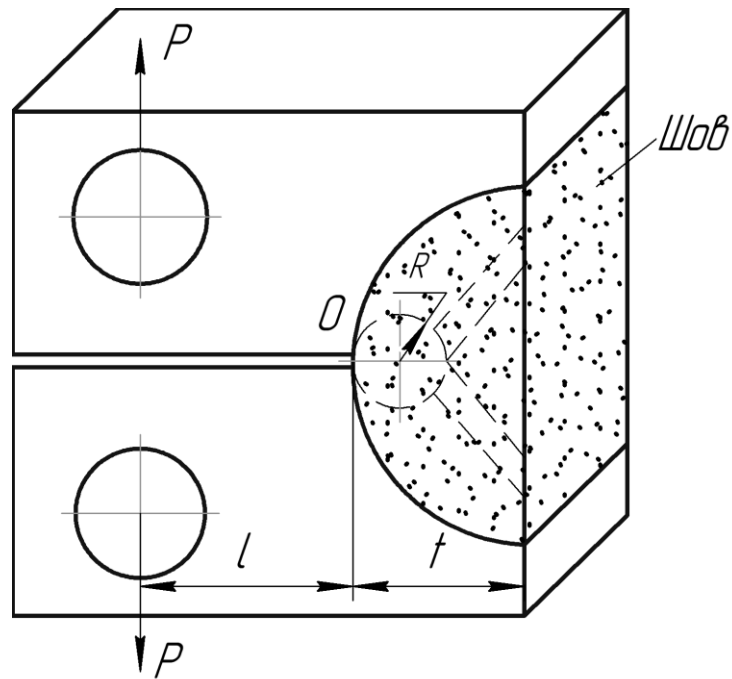


Рисунок. 2.3 - Компактний зразок із радіусним зварним швом для визначення міцності шва:

l - відстань від точки прикладання розривного навантаження до центра зразка (точки O); t — товщина зварного шва; штрихові лінії на рисунку вказують напрямки можливих ліній ковзання в металі шва під час деформування.

Крім того, на рис. 2.4 наведено геометричні параметри циліндричного зразка з кільцевою канавкою та попередньо створеною тріщиною в металі кільцевої наплавки. Також показано основні конструктивні елементи цього зразка [22], що дозволяють проводити випробування при просторовому напруженому стані, подібному до умов роботи зварних елементів у реальних конструкціях.

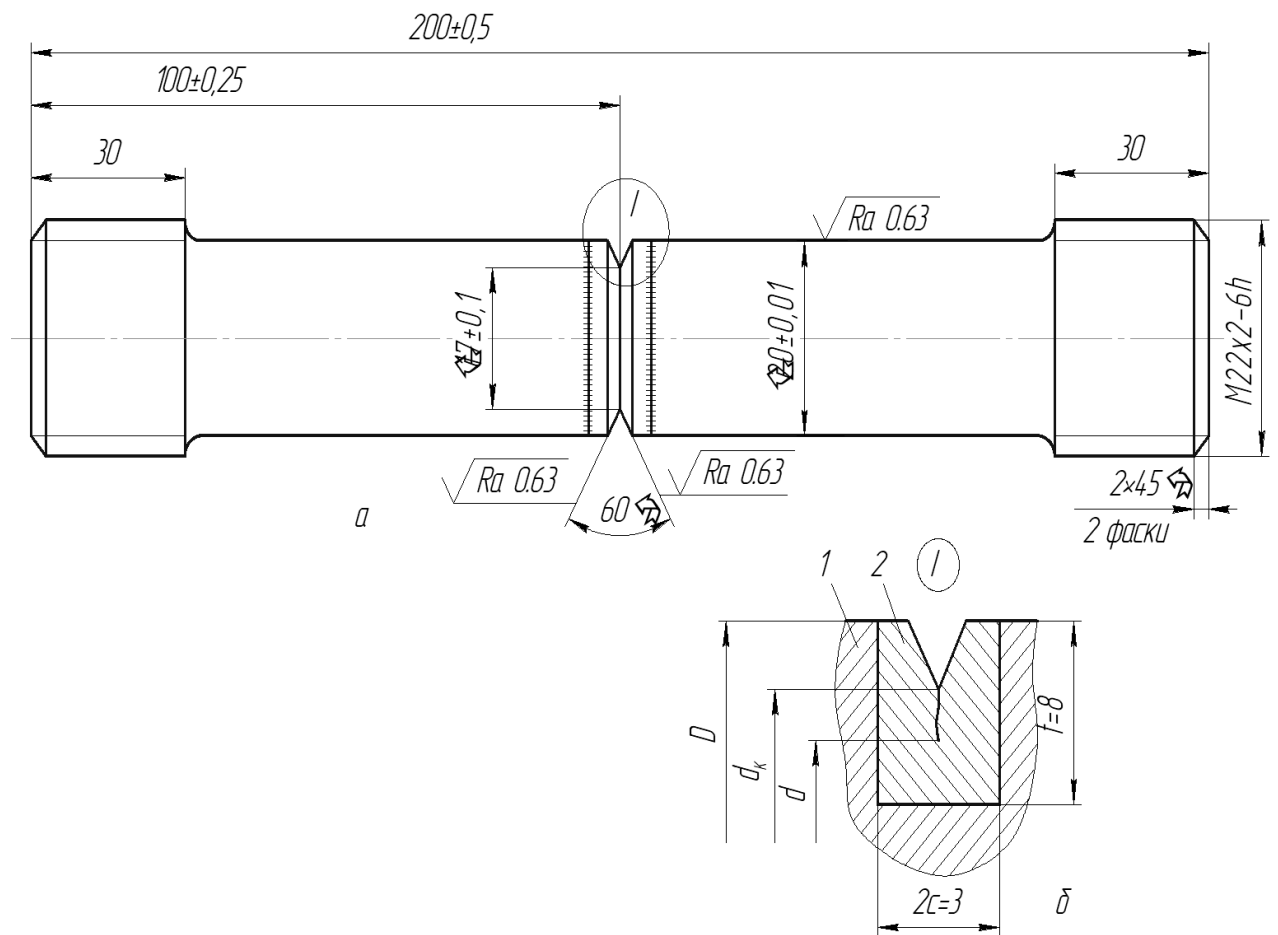


Рисунок 2.4 - Циліндричний зразок із кільцевою напавкою та тріщиною в ній (а) і конструктивні елементи зразка (б): 1 – основа підвищеної міцності та твердості; 2 – напавлений шар досліджуваного матеріалу.

Слід зазначити, що для створення умов, за яких у металі напавки реалізується крихкий механізм руйнування, геометричні параметри зразка підбирають відповідно до певних співвідношень. Зокрема, висота кільцевої канавки ($2c$) та діаметр основи зразка (D) визначаються виходячи із співвідношення розмірів кільцевої тріщини.

$$\varepsilon = \frac{d}{D} = 0,7,$$

а також із урахуванням міцності матеріалу основи.

При цьому діаметр зразка має відповідати умові:

$$D \geq 2,3 \left(\frac{K_{1C}}{\sigma_{0,2}} \right)^2 ,$$

де K_{1C} — коефіцієнт тріщиностійкості, а $\sigma_{0,2}$ — умовна межа текучості матеріалу.

Таке співвідношення забезпечує появу в зоні наплавки максимальних розтягувальних напружень і дозволяє моделювати умови крихкого руйнування у лабораторних випробуваннях. Завдяки цьому отримані результати можна екстраполювати на реальні зварні вузли, які працюють під дією складних навантажень.

Схему осьового навантаження (розтягу) для циліндричного зразка з кільцевою наплавкою наведено на рис. 2.5, де показано розташування зон розтягнення, лінії розвитку тріщини та напрям прикладення зусилля.

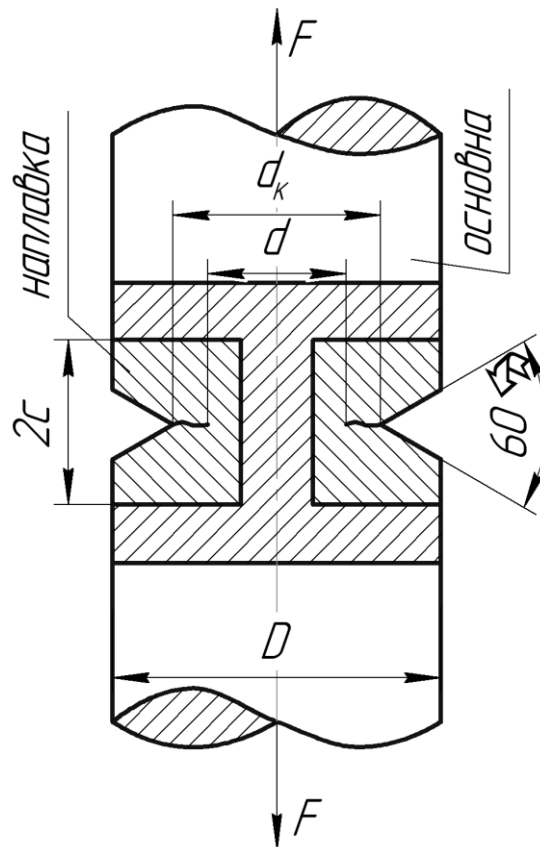


Рисунок 2.5 - Схема осьового розтягу циліндричного зразка з кільцевою наплавкою

2.2 Оцінка міцності стикових зварних з'єднань термонапруженої арматури

Для експериментального визначення міцності зварних з'єднань була розроблена модифікація відомого циліндричного зразка, який використовується при випробуваннях на руйнування. Запропонована конструкція дозволяє дослідити опір розвитку тріщини безпосередньо в металі шва стикового з'єднання арматурних сталей типу Ст4пс.

Основною метою проведеного дослідження було визначення міцності металу шва пруткової термонапруженої арматури на різних ділянках її довжини. Для цього використовувалася малогабаритна модель циліндричного зразка з кільцевою канавкою в наплавленому металі (рис. 2.6). Зразки виготовлялися методом автоматичного зварювання на модернізованому зварювальному апараті А-825М, що забезпечує стабільний режим формування шва.

Конструкція зразка включає:

- основу (1) підвищеної міцності, отриману після електротермічного зміцнення;
- зовнішню кільцеву виточку (2), призначену для наплавлення досліджуваним матеріалом;
- кільцевий V-подібний концентратор певної глибини та гостроти дна ($\rho \leq 0,1$ мм);
- кільцеву тріщину, ініційовану до глибини, що відповідає відносному параметру $\varepsilon = d/D = 0,6-0,7$, де d — діаметр перешийка в площині кільцевої тріщини, D — зовнішній діаметр циліндричного зразка, ε — відносний розмір кільцевої тріщини у зразку.

Для практичної реалізації умов випробування приймали висоту виточки $2c = 2$ мм і $\varepsilon = 0,6$.

При цьому довжина пластичних смуг (ізоклин у вершині тріщини) може бути визначена з виразу:

$$2c = l^* \cdot \tan 72^\circ \leq 0,035d.$$

Звідси отримують нерівність, що зв'язує геометричні параметри:

$$c \leq \tan 72^\circ \cdot 0,035 \cdot 0,6D.$$

Розв'язуючи її відносно D, отримують:

$$D \leq 15 \text{ мм.}$$

Отже, зовнішній діаметр зразка $D = 15$ мм є достатнім для забезпечення коректного визначення міцності наплавленого металу стикового зварного з'єднання.

Оскільки матеріал основи зразка має вищу міцність і твердість, ніж наплавлений шар, то пластичні зони, які утворюються в околі вершини кільцевої тріщини під час осьового навантаження, обмежуються висотою шару наплавки. Таким чином, під час випробування відтворюються умови, близькі до роботи більш в'язкого матеріалу в жорсткій оболонці. Це забезпечує реалізацію крихкого механізму руйнування наплавленого металу через максимальне стискання та обмеження зони пластичних деформацій перед вершиною кільцевої тріщини.

Запропонована схема дозволяє з високою точністю моделювати поведінку зварного стикового шва під дією осьового розтягу, що характерно для арматури в залізобетонних конструкціях, і є ефективною для визначення міцності при дослідженнях сталі Ст4пс.

Описаний вище підхід було апробовано під час експериментальних досліджень на прутках арматури діаметром Ø8-14 мм, виготовлених зі сталі Ст4пс, які попередньо пройшли електротермічне зміцнення відповідно до методики [11]. У процесі підготовки випробувань у шести контрольних точках уздовж кожного прутка (через кожні 1000 мм) проводили випробування на міцність металу шва у різних ділянках.

Рисунок 2.6 - Схема навантаження циліндричного зразка з кільцевою тріщиною та форма пластичних смуг у вершині тріщини наплавки (а) і конструктивні елементи зразка (б): $\alpha = 72^\circ$ — кут розкриття пелюсток смуг (ізоклін); 1, X_0 — довжина та товщина смуг (ізоклін); 1 — основа; 2 — кільцева канавка; 3 — кільцевий концентратор; 4 — кільцева тріщина.

Із зазначених ділянок прутків було вирізано заготовки довжиною 140 мм, які центрували з обох торців для забезпечення співвісності при подальшій механічній обробці. У центральній частині кожної заготовки виконували кільцеву виточку висотою $2s = 2$ мм і глибиною до $\varnothing 5$ мм, яку заплавляли зварювальним дротом Св08Г2С діаметром 1,6 мм за допомогою автомата А-826М у режимі автоматичного зварювання.

Після наплавлення поверхню циліндра проточували та шліфували до діаметра $\varnothing 14$ мм, забезпечуючи високий клас чистоти обробки. Далі нарізним

різцем формували V-подібний кільцевий концентратор по центру наплавленої зони до діаметра $d_k = 12,5$ мм, із заокругленням у донній частині радіусом $\rho \leq 0,2$ мм. На завершальному етапі алмазним шліфувальним кругом $\varnothing 200$ мм (кут при вершині $\alpha = 60^\circ$, товщина $t = 3$ мм) виконували остаточну доводку концентратора до діаметра $d_k = 12 \pm 0,02$ мм, зменшуючи радіус заокруглення дна до $\rho \leq 0,1$ мм.

Контроль геометрії виконували за допомогою радіусомірної головки, установленної на мікроскопі МІМ-7, що забезпечувало високу точність вимірювань радіуса концентратора.

Режими навантаження під час ініціювання кільцевих тріщин для 12 серій виготовлених циліндричних зразків визначали на основі міцнісних характеристик наплавленого металу. Зокрема, навантаження прикладали в межах $0,6\sigma_T$, де $\sigma_T = 730$ МПа — межа текучості сталі Св08Г2С.

Нетто-переріз зразків у зоні кільцевої тріщини становив $d = 10 \pm 0,2$ мм, що відповідало необхідним умовам для коректного визначення міцності досліджуваного матеріалу.

2.3 Методика розрахунку міцності стикових зварних з'єднань арматури

Загальні положення

Міцність стикового контактного зварного з'єднання визначається як здатність сприймати осьове розтягувальне навантаження без руйнування в зоні шва.

Розрахунок ґрунтується на експериментально визначених межах міцності у вихідному стані σ_B і межах міцності σ_3 зварного з'єднання.

Основна умова рівномірності:

$$k = \frac{\sigma_3}{\sigma_B} \geq 0.8.$$

Для кожного діаметра арматури (d) експериментально встановлюють:

- $\sigma_{\max}$ — максимальне значення міцності, Н/мм²;
- $\sigma_{\min}$ — мінімальне значення;
- $\sigma_{\text{серед}}$ — середнє значення;
- $\Delta\sigma$ — ступінь розміцнення після зварювання.

$$\Delta\sigma = \sigma_{\text{вих}} - \sigma_3.$$

Відносне розміцнення виражається у відсотках:

$$\Delta\sigma_{\text{відн.}} = \frac{\sigma_{\text{вих}} - \sigma_3}{\sigma_{\text{вих}}} \times 100\%.$$

За експериментальними даними встановлено:

- для діаметрів 12–16 мм (Ст4пс) — розміцнення 19–20 %,

Межа міцності зварного стику визначається за результатами розривних випробувань:

$$\sigma_3 = \frac{F_{\max}}{A_0},$$

де, $F_{\max}$ - максимальне навантаження при розриві, Н;

A_0 — площа поперечного перерізу арматури, мм².

Оцінка коефіцієнта міцності

$$k = \frac{\sigma_3}{\sigma_{\text{в}}}.$$

Якщо $k \geq 0.95$ - з'єднання рівно міцне;

$0.8 \leq k < 0.95$ - придатне з урахуванням допустимих втрат міцності;

$k < 0.8$ — недопустиме для експлуатації.

Узагальнений коефіцієнт ефективності з'єднання

Для оцінки технологічної ефективності зварювання вводять параметр:

$$\eta = \frac{\sigma_{\text{зв}}}{\sigma_{\text{норм}}},$$

де $\sigma_{\text{норм}}$ — нормативна межа міцності сталі відповідного класу. Якщо $\eta \geq 1$, то зварне з'єднання відповідає нормативам ДСТУ 3760:2019.

Характер руйнування та структурний аналіз

Встановлено, що руйнування стикових контактних з'єднань арматури А500С (Ст4пс) усіх діаметрів (12–18 мм) відбувається переважно в зоні термічного впливу, характер руйнування - пластичний, що підтверджує стабільність технології зварювання, зі збільшенням діаметра арматури зменшується доля зміцненого шару, тому $\Delta\sigma$ поступово знижується.

Висновки до розділу

Незважаючи на значні досягнення у розвитку теорії міцності, яка нині розглядається як самостійний розділ механіки деформівного твердого тіла, несуча здатність металевих і залізобетонних конструкцій, а також міцність арматурних елементів, що застосовуються в будівництві, суттєво залежать від умов експлуатації, попереднього навантаження, режимів електронагрівання, марки сталі та структурного стану матеріалу. Таким чином, навіть за однакових розмірів і форм арматурних стрижнів їх опір руйнуванню визначається комплексом технологічних і експлуатаційних чинників, які формують напружено-деформований стан у процесі роботи.

Відомо, що структура арматурних сталей, отриманих унаслідок металургійних процесів плавлення та прокатування, має певні недосконалості у вигляді включень, пор, мікротріщин і вакансій. Такі дефекти, особливо у зварних з'єднаннях (наприклад, у каркасах із пруткової арматури для фундаментів відповідальних будівель), стають осередками зародження початкових тріщин, що знижує загальну міцність і довговічність конструкцій. Тому виникає необхідність проведення оцінки їхньої працездатності за критерієм σ_T , що дозволяє охарактеризувати міцність матеріалу.

На сьогодні жодна з відомих теорій міцності чи методик оцінки руйнування не дає можливості повністю описати одночасно механізми трьох типів руйнування — крихкого, квазікрихкого та в'язкого. Це свідчить про складність і багатофакторність процесів, що відбуваються у конструкційних і

термонапружених арматурних сталях під навантаженням. Тому застосування розробленої експериментальної методики в поєднанні з результатами досліджень міцності дає змогу глибше зрозуміти механізми руйнування, розкрити особливості поведінки матеріалу в зоні напружень і сформулювати рекомендації щодо керування його механічними властивостями у процесі виробництва та експлуатації.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ БУДІВЕЛЬНОЇ АРМАТУРИ

3.1. Виготовлення циліндричних зразків з кільцевою заплавкою.

Маршрут виготовлення дослідних зразків є подібним до технології виробництва циліндричних зразків із кільцевим концентратором напружень. Основна відмінність полягає в тому, що замість нарізання концентратора в центральній частині циліндра виконується кільцева канавка, призначена для заплавлення кільцевого шва. Геометричні параметри — висота канавки та діаметр основи зразка — встановлюються залежно від механічних характеристик матеріалу, зокрема міцності та пластичності металу шва, що досліджується [5, 18].

Для забезпечення високої якості формування кільцевого шва процес заплавлення виконується із застосуванням механізованого обладнання та спеціалізованих пристроїв, які дозволяють витримувати стабільність зварювального процесу. Запропоновано здійснювати наплавлення на зварювальному автоматі типу А-825М, що дає змогу автоматизувати процес і досягти рівномірного розподілу тепла по колу зразка. Оновлена конструкція та модернізований принцип роботи автомата А-825М забезпечують можливість отримання як однорідних, так і неоднорідних стикових зварних з'єднань при використанні циліндричних заготовок. Докладний опис конструкції й принципу роботи модернізованого пристрою наведено нижче.

Суттєвою особливістю запропонованого методу є те, що основою зразка слугують термонапружені арматурні сталі, а канавку під шов заповнюють зварювальним дротом Св08Г2С, який за хімічним складом і структурними характеристиками близький до сталей Ст4пс [10]. Таке поєднання матеріалів дозволяє моделювати реальні умови роботи стикових з'єднань арматури, що забезпечує достовірність експериментальних результатів.

3.2. Опис пристрою для кругового заплавлення кільцевого шва у циліндричному зразку

Пристрій для базування та фіксації циліндричного зразка-заготовки під час заплавлення представлено на рис. 3.1. Конструкція забезпечує надійне закріплення заготовки, точне співвісне положення зварювального інструмента та стабільність швидкості обертання під час формування кільцевого шва, що має вирішальне значення для рівномірності проплавлення по всій окружності.

Рисунок 3.1 - Пристрій базування та закріплення для кругового заплавлення кільцевого шва у кільцевій канавці циліндричного зразка на модернізованому автоматі А-825М: 1 – стояк приводу; 2 – поворотний столик; 3 – трьох кулачковий патрон затискний; 4 – кожух захисний; 5 – циліндричний стакан; 6 – кришка; 7 – зразок під заплавлення; 8 – мундштук зі шлангом; 9 – стійка для мундштука автомата.

На рисунку 3.1 наведено схему пристрою для фіксації та базування циліндричних зразків під час виконання операції заплавлення кільцевого шва.

Пристрій є складовою частиною модернізованого зварювального автомата А-825М і призначений для автоматизованого формування кільцевих зварних швів на циліндричних заготовках малого діаметра (до 20 мм) при дослідженнях тріщиностійкості металів.

Загальна конструкція пристрою

Основу пристрою становить жорстка станина, на якій змонтовано поворотний шпindelний вузол із патронним механізмом для закріплення циліндричного зразка-заготовки. Поворотний вузол забезпечує плавне обертання зразка навколо своєї осі під час зварювання, що дає змогу сформувати рівномірний кільцевий шов по всій окружності. Привід обертання здійснюється через редуктор від електродвигуна постійного струму, який дозволяє регулювати швидкість обертання в межах 0,1–2 об/с залежно від діаметра зразка та режиму зварювання.

На протилежному кінці зразка передбачено центрувальний упор із регульованим механізмом затискання, який забезпечує співвісність деталі відносно осі обертання. Для запобігання прогину або вібраціям під час зварювання зразок додатково підтримується опорною призмою, що встановлюється під серединою його довжини.

Зварювальний вузол

Над робочою зоною змонтовано поворотну консоль із електродотримачем, який може переміщатися у вертикальному та горизонтальному напрямках за допомогою мікромеханізму точного регулювання. Це дозволяє виставити оптимальну відстань між електродом і поверхнею зразка, а також кут нахилу пальника до поверхні канавки для забезпечення якісного проплавлення.

Як електрод використовується зварювальний дріт Св08Г2С діаметром 1,6 мм, який подається механізованим подавачем зі стабілізованою швидкістю. Живлення дуги здійснюється від джерела постійного струму типу ВДУ-506, яке забезпечує стабільне горіння дуги при зварюванні малих діаметрів.

Система керування і модернізація автомата

У процесі модернізації автомата А-825М було передбачено введення регулятора швидкості обертання, синхронізованого з подачею зварювального дроту, що дає змогу підтримувати постійну товщину наплавленого шару. Крім того, встановлено механізм мікроподачі зразка вздовж осі обертання, який дозволяє виконувати багатопрохідне заплавлення для отримання рівномірного шару наплавленого металу по висоті кільцевої канавки.

Удосконалена конструкція пристрою дає змогу:

- забезпечити стабільне положення зварювальної дуги відносно поверхні зразка;
- зменшити відхилення геометрії шва по колу не більше ніж на $\pm 0,05$ мм;
- проводити заплавлення як однорідних, так і неоднорідних матеріалів;
- досягати високої якості проплавлення та мінімізувати дефекти типу підрізів і пор.

Переваги використання

Використання модернізованого пристрою дозволяє:

- підвищити точність формування кільцевих швів на зразках малого діаметра;
- забезпечити повторюваність геометрії дослідних зразків;
- створити стабільні умови теплового циклу зварювання, що важливо при вивченні впливу структури металу шва на показники тріщиностійкості;
- скоротити тривалість підготовчих і технологічних операцій.

Маршрут виготовлення кільцевого шва у циліндричному зразку

Процес виготовлення циліндричних зразків із кільцевим швом здійснюється за послідовною технологічною схемою, яка передбачає такі основні операції:

- ☐ встановлення зразка-заготовки з кільцевою канавкою у базувальні центри з подальшим вертикальним затисканням у трикулачковому патроні;
- ☐ заправлення касети порошковим дротом Св08Г2С діаметром 1,6 мм;
- ☐ підведення зварювального мундштука з поданим дротом у зону кільцевої канавки;
- ☐ вмикання приводу обертання циліндричного зразка навколо осі;
- ☐ виконання операції заплавлення кільцевої канавки, при цьому глибина шва становить 5 мм, а ширина — 3 мм.

Рекомендовані режими зварювання:

- ☐ струм постійний — 650...700 А,
- ☐ напруга дуги — 30...32 В,
- ☐ виліт електрода — 20 мм,
- ☐ полярність — зворотна.

Після завершення процесу шов очищають від шлакових нашарувань і бризок, далі проводиться візуальний контроль якості заплавлення — перевіряють відсутність поверхневих дефектів: тріщин, раковин, непроварів або кратерів. У разі виявлення дефектів поверхню зачищають і повторно заплавають дефектну ділянку.

Після цього зразок знімають із базувального пристрою і направляють на шліфування зовнішньої поверхні, а потім виконують нарізання кільцевого концентратора по центру заплавленої зони.

Аналогічна технологічна послідовність дій повторюється для кожного наступного циліндричного зразка.

Для захисту вузлів зварювального автомата від потрапляння розплавлених частинок порошкового дроту під час заплавлення передбачено трубчастий мідний кожух (поз. 4) з оглядовим вікном, який одночасно виконує функцію теплового екрана.

Пристрій дає змогу проводити зварювання кільцевих канавок на циліндричних зразках діаметром від 8 до 200 мм з можливістю регулювання частоти обертання стола в діапазоні $\omega = 2\text{--}40$ об/хв.

Найкращі показники якості шва досягаються за частоти обертання $\omega = 2\text{--}5$ об/хв, що забезпечує повне проплавлення і рівномірне формування наплавленого шару по колу.

У випадках зміни матеріалу заготовки або діаметра зразка режими роботи пристрою необхідно коригувати експериментальним шляхом, враховуючи теплофізичні властивості досліджуваної сталі.

Експериментальні дослідження на осьовий розтяг

Випробування циліндричних зразків із кільцевою тріщиною проводили на розривній машині “Instron” (рис. 3.2) у режимі осьового розтягу.

Швидкість переміщення рухомого захоплювача становила $v = 2$ мм/хв, при цьому в автоматичному режимі реєструвалася діаграма навантаження в координатах “сила – деформація” ($F\text{--}\epsilon$).

Для кожного зразка фіксували значення граничного навантаження $P = P^*$, а також вимірювали геометричні параметри: зовнішній діаметр D , діаметр у зоні тріщини d_{tr} та відносну глибину тріщини $\epsilon = d_{tr}/D$.

На основі цих даних, використовуючи відповідні розрахункові формули, визначали міцність металу шва для кожної партії зразків.

3.3 Експериментальні дослідження та дослідження їх результатів

Досліди виконували для шести партій зразків, виготовлених із шести контрольних ділянок вздовж довжини прутків із сталей Ст4пс, що дозволило простежити залежність σ_T від місця відбору зразка та структурних відмінностей металу після електротермічного зміцнення.

Рисунок 3.2 - Загальний вигляд 25-ти тонної розривної машини Instron марки РМ-25 під час осьового розтягу зварного з'єднання арматурних стрижнів

Експериментальні дослідження включали в себе випробування на розтяг зразків арматури у вихідному стані і з стиковим контактним зварним з'єднанням.

Зразки включали в себе арматуру Ø12A500С, Ø14A500С, Ø16A500С і Ø18A500С зі сталі марки Ст4пс, де слід очікувати найбільшого розміцнення у зварному з'єднанні. Зразки відбиралися з різних плавок і включали в себе по 6 зразків для випробування у вихідному стані і по 6 зразків зварних з'єднань. Всього було випробувано 36 зразків зварних з'єднань.

Результати випробувань зразків арматури у вихідному стані наведені відповідно у таблиці 3.1.

Руйнування всіх дослідних зразків зварних з'єднань відбувалося у зоні термічного впливу і носило пластичний характер.

Таблиця 3.1 - Механічні характеристики зразків арматури зі сталі Ст4пс у вихідному стані

№ п/п	Діаметр, мм	Марка сталі	Кількість зразків, шт.	σ_T , Н/мм ²		
				максим.	мінім.	серед.
1	12	Ст4пс	6	742	656	693
2	14		6	734	648	688
3	16		6	728	633	677
4	18		6	751	632	683

Результати проведених випробувань зразків зварних з'єднань наведено в таблиці 3.2, і на рис. 3.3 – 3.7 у вигляді графічних залежностей.

Таблиця 3.2 - Результати випробувань зразків стикових зварних з'єднань.

№ п/п	Діаметр, мм	Марка сталі	Кількість зразків, шт.	$\sigma_{зв}$, Н/мм ²		
				максим.	мінім.	серед.
1	12	Ст4пс	6	588	541	566
2	14		6	592	539	558
3	16		6	578	532	553
4	18		6	581	536	562

На графіку рис 3.3 зображено залежність межі міцності зварного з'єднання арматури ($\sigma_{зв}$, Н/мм²) від діаметра арматурних стрижнів (12–18 мм). Наведено три криві, що відображають максимальні, середні та мінімальні значення міцності для кожного діаметра.

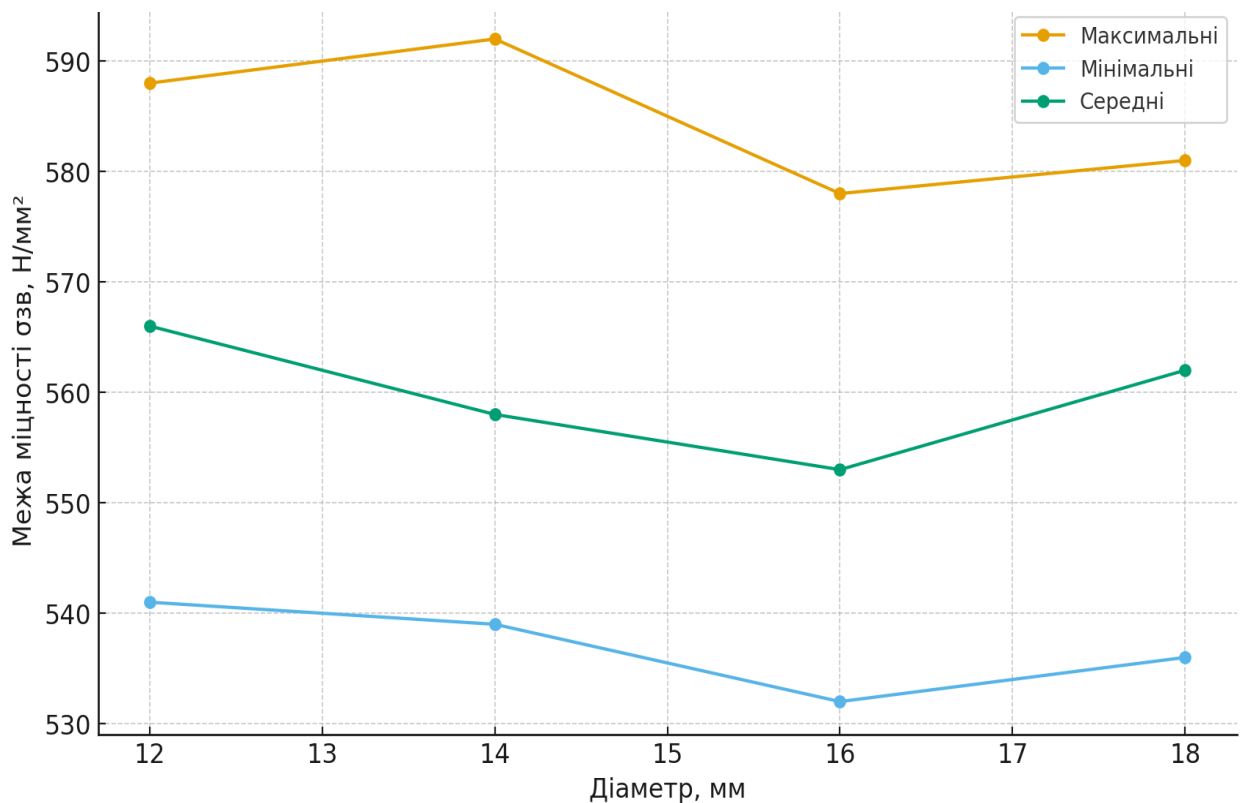


Рисунок 3.3 - Максимальні, мінімальні та середні значення межі міцності стикових зварних з'єднань.

Характеристика кривих:

□ Помаранчева лінія (максимальні значення) має найвищі показники у всьому діапазоні діаметрів. Міцність коливається в межах 580–592 Н/мм², причому спостерігається незначне зниження при діаметрі 16 мм, після чого значення знову підвищується до приблизно 585–588 Н/мм². Це свідчить про стабільність процесу зварювання та достатній рівень якості з'єднання при зміні перерізу арматури.

□ Зелена лінія (середні значення) демонструє подібну тенденцію, проте із нижчими значеннями — у межах 550–568 Н/мм². Мінімум спостерігається при діаметрі 16 мм, що може бути пов'язано з меншою ефективністю проплавлення металу шва або локальними відхиленнями в структурі матеріалу.

□ Блакитна лінія (мінімальні значення) відображає найменші результати міцності, що змінюються в діапазоні 530–542 Н/мм². Її форма

свідчить про подібну закономірність — невелике зниження міцності в середньому діапазоні діаметрів і часткове підвищення при збільшенні до 18 мм.

Із ростом діаметра арматури від 12 до 16 мм спостерігається тенденція до зниження міцності, особливо помітна для середніх і мінімальних значень. Це може бути пов'язано з неоднаковими умовами тепловідведення під час зварювання або з підвищеним рівнем залишкових напружень у більш товстих стрижнях. Починаючи з діаметра 16 мм, міцність дещо зростає, що може бути наслідком кращого формування зварного шва та стабілізації структури металу після охолодження. Різниця між максимальними та мінімальними значеннями становить у середньому близько 50–60 Н/мм², що свідчить про певну нерівномірність якості швів, але при цьому усі значення залишаються в межах допустимих для конструкційної арматури.

Отримані результати показують, що якість стикових зварних з'єднань арматури стабільна в усьому діапазоні діаметрів, хоча міцність дещо зменшується для середніх діаметрів (14–16 мм). Загалом, середня межа міцності становить близько 560 Н/мм², що підтверджує надійність та технологічну ефективність процесу зварювання.

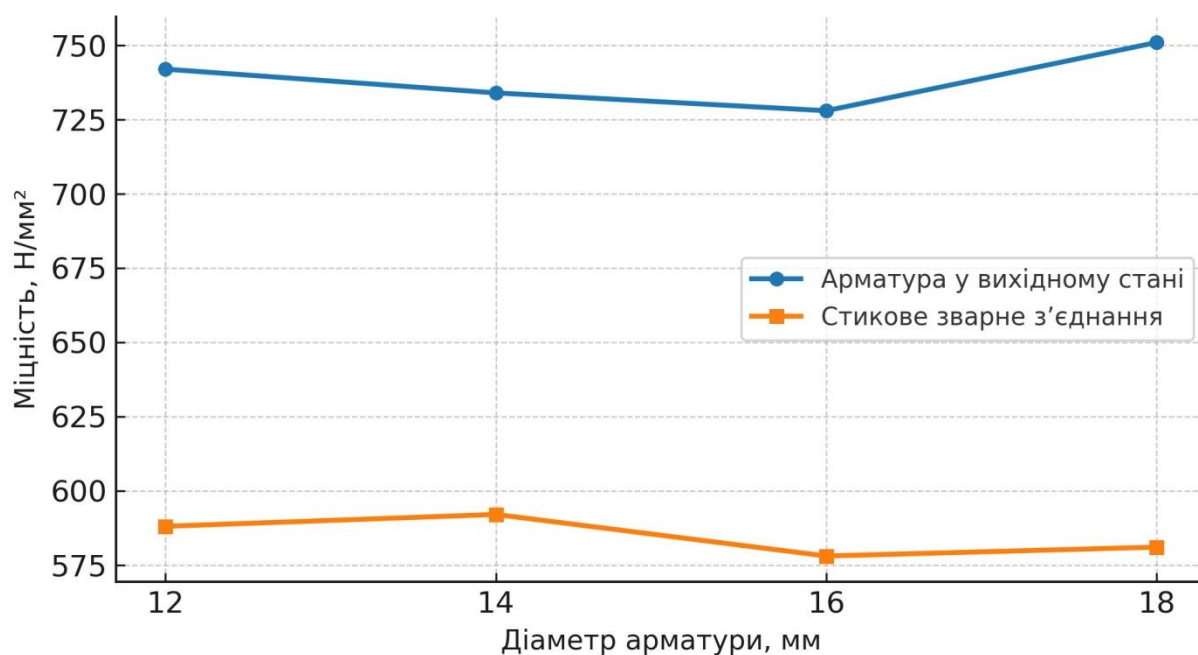


Рисунок 3.4 - Максимальні значення міцності арматури у вихідному стані і міцності стикового зварного з'єднання

На рисунку 3.4 подано порівняння максимальних значень міцності σ_T для арматури у вихідному стані та після стикового зварювання. Крива для вихідного металу (Ст4пс) демонструє значення в межах 728–751 Н/мм², що свідчить про високу якість прокатного матеріалу. Для зварних з'єднань (Ст4пс) значення становлять 578–592 Н/мм², тобто в середньому на 20–23 % нижче від вихідного стану.

Помітно, що зі збільшенням діаметра арматури міцність має слабо виражену мінімум при Ø16 мм, що пояснюється утворенням ширшої зони термічного впливу та менш інтенсивним охолодженням металу після осадки. Після Ø18 мм спостерігається часткове відновлення міцності, що свідчить про стабілізацію температурного режиму при зварюванні більших перерізів.

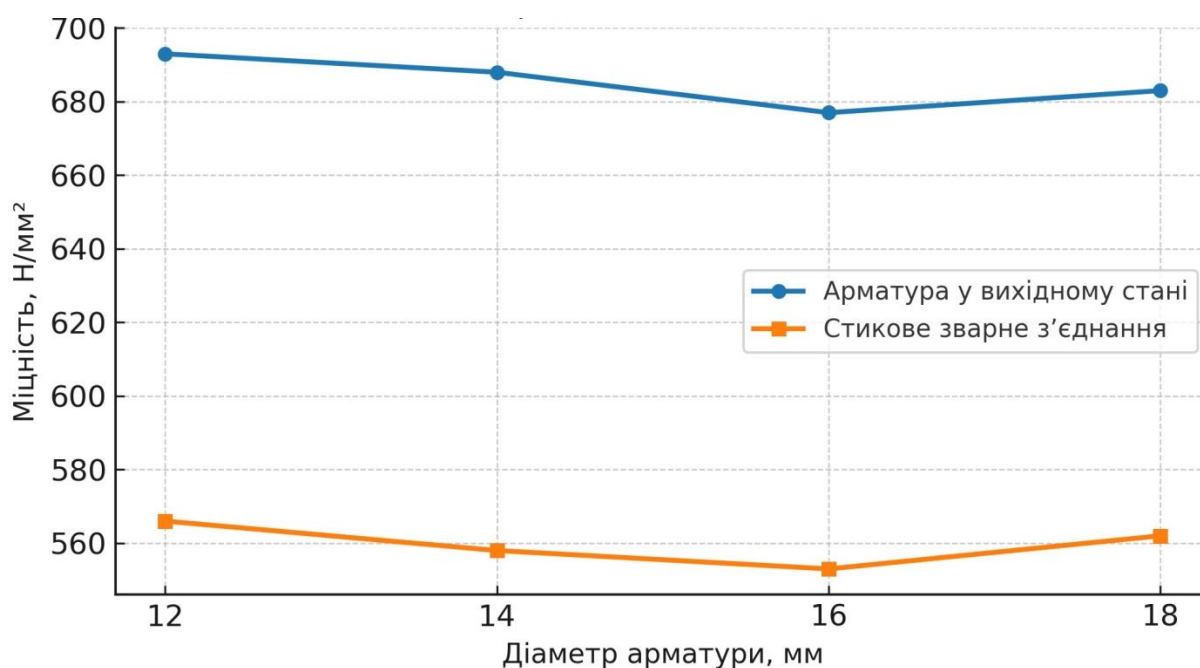


Рисунок 3.5 - Середні значення міцності арматури у вихідному стані і міцності стикового зварного з'єднання

На рисунку 3.5 показано середні значення міцності σ_T для обох типів зразків. У вихідному стані арматура має $\sigma_T \approx 677\text{--}693$ Н/мм², тоді як після зварювання значення зменшуються до 553–566 Н/мм².

Характер зміни кривих свідчить про загальну стабільність технології стикового контактного зварювання — розбіжність результатів між серіями не перевищує 5 %. Зі збільшенням діаметра до Ø16 мм спостерігається зниження міцності до мінімального рівня, після чого при Ø18 мм відбувається невелике зростання, що корелює з рівномірністю прогріву торців при зварюванні більших стрижнів.

Середнє зниження міцності після зварювання становить приблизно 120 Н/мм², що відповідає розміцненню $\Delta\sigma \approx 17\text{--}18\%$ відносно вихідного металу. Це підтверджує, що з'єднання залишаються рівно міцними згідно з вимогами ДСТУ 3760:2019 ($k \geq 0.8$).

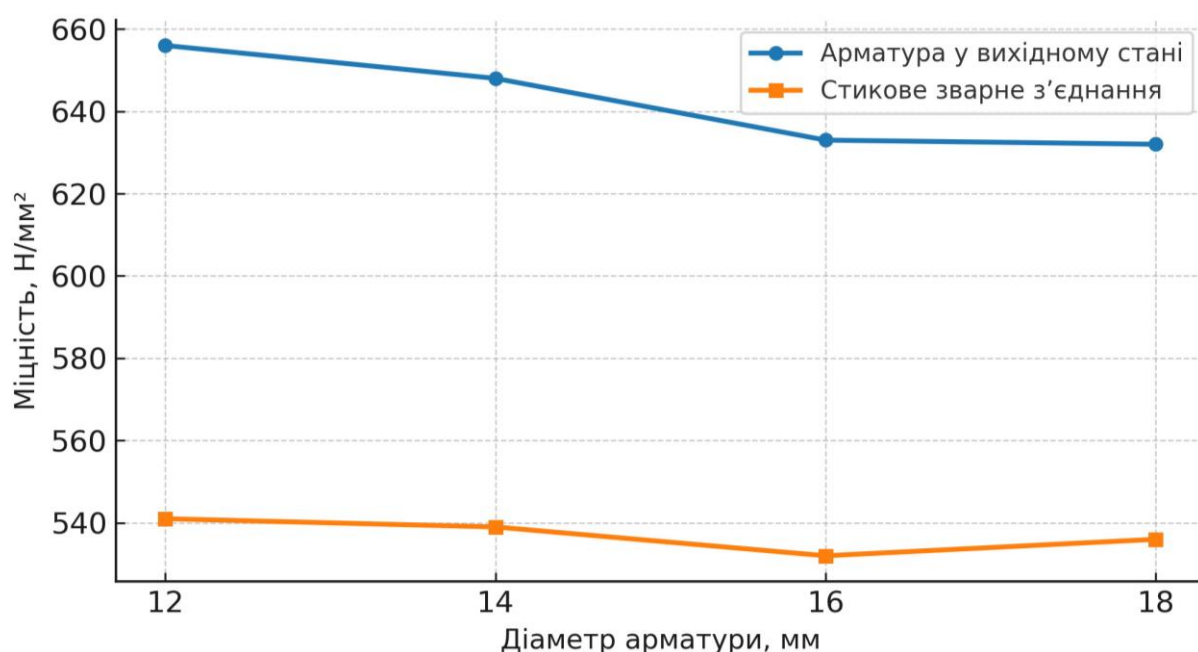


Рисунок 3.6 - Мінімальні значення міцності арматури у вихідному стані і міцності стикового зварного з'єднання

На графіку рис. 3.6 наведено мінімальні значення σ_T , які відображають найслабші результати випробувань у серії. Для арматури у вихідному стані σ_T становить 632–656 Н/мм², а для зварних з'єднань — 532–541 Н/мм².

Навіть у найгірших випадках зварні стики зберігають міцність понад 500 Н/мм², що вище за нормативну межу міцності для сталі Ст4пс ($\sigma_T \geq 490$).

Н/мм²). Таким чином, усі стикові з'єднання відповідають критерію працездатності й можуть застосовуватись у несучих конструкціях.

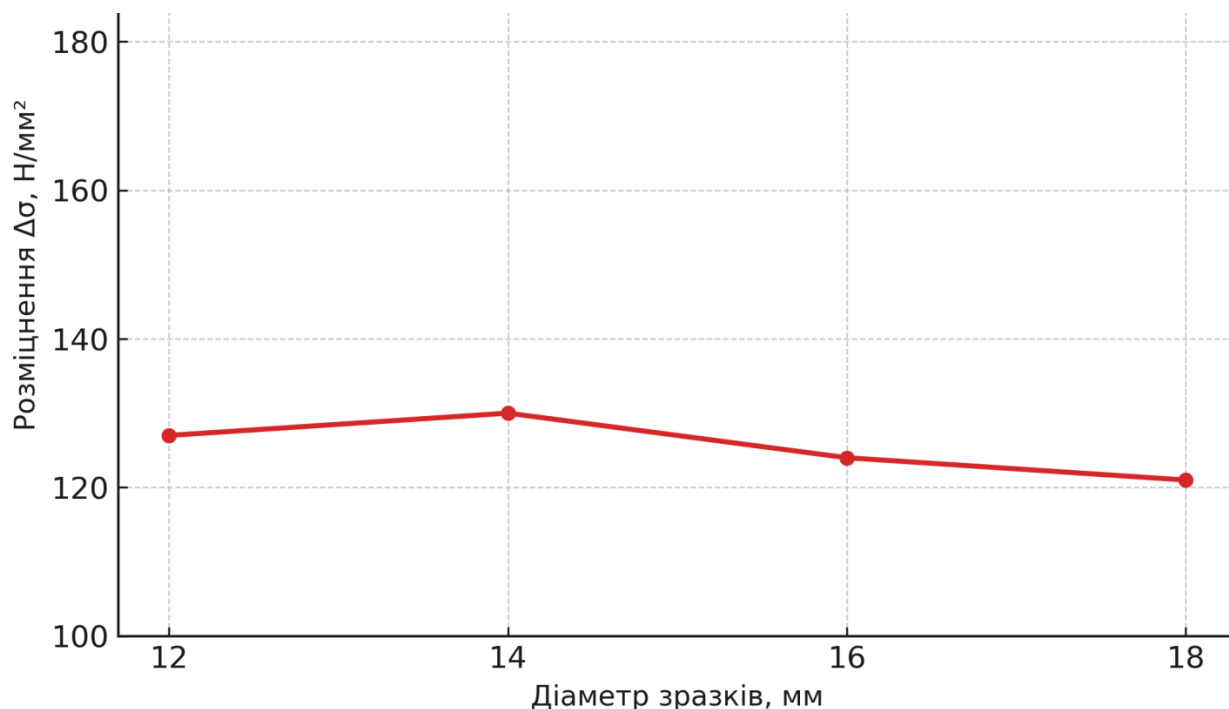


Рисунок 3.7 - Середні значення розміцнення стикового зварного з'єднання в залежності від діаметру зразків.

На рисунку 3.7 наведено зміну середніх значень розміцнення ($\Delta\sigma$) стикового зварного з'єднання арматури зі сталі Ст4пс залежно від діаметра стрижнів. Розміцнення визначалося як різниця між межею текучості арматури у вихідному стані (σ_T) та межею міцності стикового з'єднання ($\sigma_{зв}$):

$$\Delta\sigma = \sigma_T - \sigma_{зв}.$$

З графіка видно, що зі збільшенням діаметра арматури спостерігається незначна тенденція до зростання $\Delta\sigma$. Для стрижнів Ø 12–14 мм розміцнення становить близько 120–130 Н/мм², а для Ø 16–18 мм — до 140–150 Н/мм². Це свідчить про дещо більші втрати міцності в зонах зварювання при збільшенні перерізу стрижня, що пояснюється ускладненням теплового режиму та розширенням зони термічного впливу.

Висновки за результатами графічного аналізу

1. Усі графіки демонструють стабільний характер зміни міцності при переході від вихідного стану до стикового з'єднання.
2. Зниження міцності після зварювання становить у середньому 15–20 %, що пояснюється впливом термічного циклу, рекристалізацією металу та зміною структури в зоні шва.
3. Попри це, отримані значення задовольняють вимоги рівноміцності ($k \geq 0.8$), а зварні з'єднання арматури можуть бути рекомендовані для практичного використання у будівельних залізобетонних конструкціях.
4. Найменше розсіювання результатів спостерігається для Ø18 мм, що підтверджує оптимальність технологічного режиму для великих діаметрів.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Загальні положення

Охорона праці є невід'ємною складовою будь-якої виробничої діяльності, спрямованої на збереження життя, здоров'я та працездатності працівників у процесі трудової діяльності. Відповідно до Закону України «Про охорону праці», роботодавець зобов'язаний створювати безпечні та нешкідливі умови праці, проводити навчання з питань безпеки, забезпечувати працівників засобами індивідуального захисту (ЗІЗ), контролювати стан виробничого середовища.

Під час виконання робіт, пов'язаних із зварюванням арматури, діють специфічні фактори ризику: висока температура, електричний струм, яскраве світлове випромінювання, токсичні гази, шум, можливість ураження електричним струмом, опіків і травм. Тому зварювальні дільниці повинні бути обладнані згідно з вимогами ДНАОП 0.00-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» та ДСТУ EN ISO 4063:2018 «Процеси зварювання».

Вимоги безпеки. ГОСТ12.2.003 “Виробниче обладнання. Загальні вимоги безпеки” встановлює вимоги безпеки до виробничого обладнання в частині конструкцій, органів його управління, засобів захисту, які входять в конструкцію, а також вимог безпеки, які визначаються особливостями монтажних і ремонтних робіт, транспортуванням і зберіганням виробничого обладнання.

Обладнання повинне бути безпечним при монтажі, експлуатації, ремонті, транспортуванні і зберіганні, не повинно забруднювати викидами, шкідливих речовин навколишнє середовище (повітря, ґрунт, водойми) вище встановлених норм. Безпечність обладнання забезпечується вибором принципу дії, конструктивних схем, безпечних елементів конструкції і т. п.,

застосуванням засобів механізації, автоматизації, дистанційного управління і захисту; виконанням ергономічних вимог; включенням вимог безпечності в технічну документацію по монтажу, експлуатації, ремонту, транспортуванню і зберіганню.

Обладнання повинно бути пожеже - і вибухобезпечним, стійким до підвищення вологості, коливання тиску і температури, дії агресивних речовин, обледеніння, вітрових навантажень.

Крім загальних вимог безпеки до виробничого обладнання необхідно враховувати також специфічні вимоги до обладнання м'ясної промисловості, передбачені стандартом ОСТ 27-00-216 "Виробничі машини і обладнання. Загальні вимоги безпеки".

Робочі місця обслуговуючого персоналу повинні знаходитися поза зоною переміщення механізмів.

Конструкція обладнання повинна передбачати заходи (теплоізоляція) з обмеження виділення конвекційного променевого тепла. В машинах з місцевим охолодженням повинен бути пристрій, який блокує запуск машин при відсутності холодоагенту.

Обладнання, яке виділяє вологу, гази порох і сторонні запахи, повинне бути максимально герметизоване. При недостатній герметизації необхідно використати місцеві відсмоктування повітря.

Зовнішні виступаючі частини обладнання повинні бути заокруглені по радіусі не менше 5 мм і не мати зазубрень, напливів металу після зварки.

Кнопки включення виробничого обладнання повинні бути заглиблені на 3-5 мм в корпусі пускової коробки.

Органи управління (кнопки, ричаги, маховички і т. д.) в постійного робочого місця повинні розміщатися в робочій зоні, обмеженої в межах: по довжині не більше 0,7 м, по глибині не більше 0,4 і по висоті не більше 0,6 м; вказані органи управління повинні бути над рівнем підлоги (площадки) на висоті в межах від 0,9 до 1,5 м при обслуговуванні стоячи і на висоті 0,6-1,2 м при обслуговуванні сидячи. Всі кнопки, ричаги, маховички і інші органи

управління повинні мати позначення і надписи, які пояснюють їх функціональне призначення, а також пофарбовані у відповідні кольори:

- ☐ червоний колір – зупинка;
- ☐ ахроматичний колір (чорний, білий чи сірий), допускається зелений - пуск;
- ☐ ахроматичний колір – поперемінні зупинка чи пуск;
- ☐ жовтий колір – аварійне включення;
- ☐ ахроматичний або синій колір – спеціальне включення.

Площадки обслуговування машин і обладнання, розміщені на висоті, повинні мати огорожі і сходи з поруччям, а площадки крім цього, - повинні мати вільний прохід шириною не менше 0,7 м. Покрив площадок повинен виключати слизькість і мати по краях суцільну обшивку на висоті 0,15 м. Висота огорожі і перил повинна бути не менше 1 м, а на висоті 0,5-0,6м від покриття площадки (сходів) необхідно розмішувати додаткові повздовжні огорожі і вертикальні стійки з кроком не більше 1,2 м. Сходи на висоті 3-5 м повинні мати перехідні площадки; ширина сходів не менше 0,6 м, проміжок між сходами – 0,2, ширина сходини – не менше 0,12м. Сходи висотою більше 1,5 м повинні мати нахил не більше 45°, меншої висоти не більше 60° до горизонту.

Зусилля на важелі, постійного використання при ручному управлінні не повинно перевищувати 40 Н, а при ручному регулюванні і накладанні – 100 Н.

Пускові педалі ніжного управління обладнанням повинні мати огороження або попереджувальні пристрої, які виключають випадкове включення обладнання (падіння предмету, випадкове натиснення). Огородження педалі повинно бути міцним, не мати гострих країв і не обмежувати рухів ноги. Площадка пускової педалі повинна бути прямою з рифленою поверхнею (неслизькою) і мати заокруглені з початку і упору для ноги в кінці. Ширина педалі повинна бути не меншою 80 мм, а довжина до упору 110-130 мм. Підвищення педалі над рівнем підлоги площадки (перед її

включенням) не повинно перевищувати 120 мм, а прогин її (після включення) – 60 мм; посилення при натисканні на педаль в положенні сидяче – 24,5 Н, в положенні стоячи – 34,5 Н.

Засуви, гвинти і крани, розміщені вище 2 м від рівня підлоги (робочої площадки або заглиблені, повинні мати пристрої (ричагові, штангові і ін.) які б дозволили відкривати і закривати їх з робочого місця.

Стаціонарна контрольно-вимірна апаратура повинна бути встановлена на робочих місцях не вище 2 м від рівня підлоги (робочої площадки).

Струмopовідні частини обладнання повинні бути надійно електроізолювані, огорожені або знаходитися в недоступних до людей місцях.

Температура нагрітих поверхонь обладнання, огороження і трубопроводів на робочих місцях не повинна перевищувати 45с.

Конструкція обладнання, працюючого під тиском, повинна відповідати правилам його проектування, виготовлення і експлуатації.

Економічно доцільно застосовувати універсальне (за призначенням) і багатоопераційне обладнання. Воно повинно бути дешевим, надійним і довговічним. Таке обладнання можна створювати за принципом агрегатування, застосовуючи загальний привід і змінні органи для виконання різних операцій. Деталі і вузли повинні уніфіковані і мати мінімальні розміри.

Для роботи обладнання на підприємствах, як правило, не потрібне використання пари (особливо високого тиску), стиснутого повітря і газу.

Для експлуатації обладнання на підприємствах необхідні спеціально підготовлені технології, механіки, лаборанти і робочі.

Найбільш ефективною робота обладнання всього малого виробництва в цілому буде при використанні місцевих природних джерел тепло-, водо- і холодопостачання. При проектуванні виробництва необхідно враховувати можливість використання натурального холоду для зберігання сировини і продукції.

4.2. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Під час виконання зварювальних робіт на ділянці контактного стикового зварювання на працівника можуть впливати такі основні фактори табл. 4.1

Таблиця 4.1 - Фактори можуть впливати на працівника під час виконання зварювальних робіт.

№	Потенційно небезпечний фактор	Джерело виникнення	Можливі наслідки	Заходи безпеки
1	Електричний струм високої сили	Зварювальний апарат	Ураження електричним струмом	Заземлення обладнання, ізоляція, справні кабелі
2	Висока температура, розпечений метал	Зона стику	Опіки шкіри, запалення одягу	ЗІЗ: рукавиці, спецодяг, щиток
3	Інтенсивне світлове випромінювання	Зварювальна дуга	Ураження очей, опіки рогівки	Захисні окуляри або щиток з фільтром
4	Виділення газів і диму	Зварювання, нагрівання	Отруєння, подразнення слизових	Вентиляція, місцеві відсмоктувачі
5	Шум і вібрація	Зварювальні машини, компресори	Підвищена втома, порушення слуху	Використання навушників, техобслуговування машин
6	Рухомі елементи машин	Затискні механізми, осаджувальні частини	Травми рук, пальців	Захисні кожухи, блокування, інструктаж

Охорона навколишнього природного середовища – це система заходів направлених на забезпечення гармонійної взаємодії суспільства і природи , на основі збереження, виробництва і раціонального використання природних ресурсів.

Відходи виробництва пов'язані з викидами в атмосферу шкідливої пилюки і газів викидами у водойми стічних вод, які їх забруднюють і стравлюють, погіршують стан ґрунту, який знаходиться біля підприємства.

Моделювання процесів формування та виникнення травмонебезпечних і аварійних ситуацій на виробництві

У зображеннях процесів формування, виникнення аварій та виробничих травм усі випадкові події (явища), що утворюють конкретну аварійну або травмонебезпечну ситуацію, пов'язані між собою причинно-наслідковими зв'язками. В них є початкові, проміжні та кінцеві події.

Початкові події (небезпечні умови, небезпечні дії) виявляють у процесі обстеження об'єктів виробництва, а проміжні та кінцеві входять до схеми на основі логічного аналізу можливих варіантів перебігу подій.

Слід зауважити, що поняття «початкові події» введено умовно, бо насправді цим подіям можуть передувати інші. Але вони першими помічаються при обстеженні робочих місць та інших об'єктів виробництва.

Якщо на схемах, що зображують процеси протікання (перебігу) випадкових подій, починаючи з початкових і закінчуючи кінцевими, показати причинно-наслідкові зв'язки, то ми одержимо логічні моделі процесів, що вивчаються.

Кожна логічна модель процесу формування та виникнення небезпечної або аварійної ситуації складається з певної кількості випадкових подій, які між собою можуть бути статистично залежними або незалежними. Статистичне залежні події — це такі, коли поява наступної події неможлива без виникнення попередньої. Якщо кожна з двох подій, що входять до однієї моделі, можуть з'являтися незалежно одна від одної, то такі події є статистичне незалежними. Як правило, у таких моделях незалежні

випадкові події одна відносно одної розміщуються паралельно, а залежні — послідовно. Причинно-наслідкові зв'язки зображені стрілками, які, крім того, ще показують напрямок протікання (перебігу) подій.

Шляхом дослідження небезпечних ситуацій, які можуть виникати при експлуатації виробничого обладнання, описані і побудовані логічні моделі різні за формою і характером подій. Це дало можливість перейти до побудови більш складних моделей аварій, травм і катастроф, які потрібні для встановлення причин виникнення потенційних небезпек, без чого неможливо вжити обґрунтованих профілактичних заходів.

Метод логічного моделювання потенційних аварій, травм і катастроф відкриває можливість розробити досконалу систему управління безпекою життєдіяльності виробництва, яка базується на оперативному пошуку виробничих небезпек, їх глибокому логічному (при необхідності і математичному) аналізі й терміновому прийнятті заходів для усунення потенційних небезпек ще до виникнення травмонебезпечних та катастрофічних ситуацій.

Процес пошуку потенційних небезпек на виробництві ґрунтується на більш точному і ефективному проведенні існуючого оперативного контролю, який також повинен бути відповідно удосконалений.

Аналізуючи кожну з побудованих логічних моделей процесів формування та можливого виникнення травмонебезпечних та аварійних ситуацій, завжди можна знайти подію, з якої починається небезпечний процес і до виникнення небезпечних наслідків.

Якщо дослідження логічних зв'язків провести у зворотному напрямку, то обов'язково можна знайти ту подію (явище), що є причиною (однією з причин) формування досліджуваного процесу.

Метод логічного моделювання травмонебезпечних, аварійних та інших ситуацій значно полегшує пошук причин аварій, виробничих травм і дорожньо-транспортних пригод при їх розслідуванні.

Вивчені, побудовані і систематизовані логічні моделі для окремих виробничих процесів, обладнання та інших об'єктів можна програмувати, а

складений з них банк даних, може бути використаний для прогнозування виникнення аварій, травм, катастроф та інших небажаних явищ за допомогою ЕОМ.

Логічні моделі можна застосовувати при прийнятті рішень про відповідальність осіб, винних у виникненні таких пригод, а також ступінь вини самого потерпілого.

Методикою оцінки рівня небезпеки робочих місць, машин, виробничих процесів та окремих виробництв передбачено пошук об'єктивного критерію (показника) рівня небезпеки для конкретного об'єкта. Таким показником вибрана ймовірність виникнення аварії, травми або катастрофи залежно від досліджуваного явища.

Для того щоб оцінку рівня небезпеки певного об'єкта чи явища запровадити на виробництві, необхідний простий і доступний метод обчислення значень ймовірності будь-якого випадкового явища. Основні принципи цього методу полягають у тому, що на основі обстеження робочого місця чи окремої машини (об'єкта) виявляють виробничі небезпеки, можливі аварійні або травмонезбезпечні ситуації. При оцінці ситуацій визначають події, які можуть стати головною подією при побудові логіко-імітаційної моделі аварії або травми (чи катастрофи). Після цього будують модель («дерево відказів і помилок оператора»). При цьому важливе значення має правильний вибір головної випадкової події.

Головну випадкову подію (конкретна аварія, травма або катастрофа), модель якої нам необхідно побудувати, вибирають виходячи з оцінки відповідного об'єкта, виробництва чи окремої одиниці обладнання і змісту його найбільш небезпечного явища, яке за певних умов виробництва може виникнути.

Залежно від об'єкта головними подіями можуть бути:

- для технологічного обладнання: «захват одягу», «захват рук, ніг та інших елементів тіла людини», «удар», «падіння людини», «електричний удар», «опіки тіла», «опромінення» тощо;

- для підприємства в цілому: «вихід з ладу обладнання», «пошкодження електричного обладнання», «пошкодження будівель», «пожежа» тощо.

Після вибору головного випадкового явища (події) розпочинають побудову моделі («дерева»). Використовуючи оператори «І» та «АБО», виконують набір ситуацій (відомих до цього), які можуть призвести до тієї події, яка вибрана як головна.

У деяких випадках головна подія може мати; і більше однакових небезпечних ситуацій за змістом, але різних за природою і причинами виникнення.

В кожному конкретному випадку виробництва необхідно ретельно вести пошук і дослідження небезпечних ситуацій. Після визначення відповідних аварійних, травмонебезпечних або катастрофічних ситуацій та їх кількості, визначають інші події, що входять до кожної такої ситуації, логічним аналізом із застосуванням операторів «І», «АБО» та інших. Процес побудови моделі триває поки не будуть знайдені усі базові події, що визначають межу моделі.

Слід мати на увазі, що кожна випадкова подія, до якої входять базові події, може формуватися й виникати при входженні у неї двох, трьох і більше базових подій за допомогою відповідних операторів.

Повністю побудована і перевірена модель підлягає математичній обробці для визначення ймовірності кожної випадкової події, що увійшла до моделі, починаючи з базових і закінчуючи головною.

Ймовірності базових подій визначають за даними виробництва. Наприклад, базова подія «стан контролю з охорони праці». Для визначення ймовірності ми повинні встановити наскільки (%) від ідеального рівня здійснюється відповідний контроль на об'єкті. Якщо буде встановлено, що такий рівень контролю становить 50 або 30 %, то ймовірність відповідно дорівнює 0,5 і 0,3. При відсутності контролю ймовірність «не здійснення контролю» становитиме 1, якщо контроль ідеальний, то відповідна ймовірність дорівнює 0. Після обчислення ймовірності всіх подій, розміщених

у ромбах, і базових подій, починаючи з лівої нижньої гілки «дерева», позначають номерами всі випадкові події, що увійшли до моделі.

На цьому можна вважати, що певна модель підготовлена до математичної обробки. Для виконання математичних обчислень ймовірностей випадкових подій логіко-імітаційної моделі застосовують формули.

1. Нехай дві базові події з ймовірностями P_1 і P_2 за допомогою оператора «І» входять у наступну третю подію. Тоді ймовірність виникнення цієї події P_3 можна визначити так:

$$P_3 = P_1 P_2$$

2. За допомогою оператора «І» три події з ймовірностями P_1 , P_2 і P_3 формують четверту випадкову подію. Тоді ймовірність цієї події P_4 обчислюють так:

$$P_4 = P_1 P_2 P_3 \quad (4.1)$$

3. Оператор «І» об'єднує n подій з ймовірностями $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$. Тоді ймовірність вихідної події P буде

$$P = P_1 P_2 P_3 \dots P_n \quad (4.2)$$

4. Дві базові події з ймовірностями P_1 і P_2 за допомогою оператора «АБО» входять до третьої події. Тоді її ймовірність P_3 буде:

$$P_3 = P_1 + P_2 - P_1 P_2 \quad (4.3)$$

5. Оператор «АБО» об'єднує три базові події з ймовірностями P_1, P_2, P_3 які за допомогою цього оператора входять у наступну подію з ймовірністю P_4 . Тоді ймовірність цієї події можна визначити за формулою

$$P_4 = P_1 + P_2 + P_3 - P_1 P_2 - P_1 P_3 - P_2 P_3 + P_1 P_2 P_3. \quad (4.4)$$

6. Якщо в оператор «АБО» входять чотири і більше випадкових базових подій з відомими значеннями ймовірностей, то для спрощення обчислень їх згруповують по дві або по три події і застосовують наведені формули. Після визначення ймовірностей вихідних подій кожної з таких груп, їх знову необхідно згрупувати і провести аналогічні обчислення, аж поки не залишаться дві або три події, над якими необхідно провести ті ж операції.

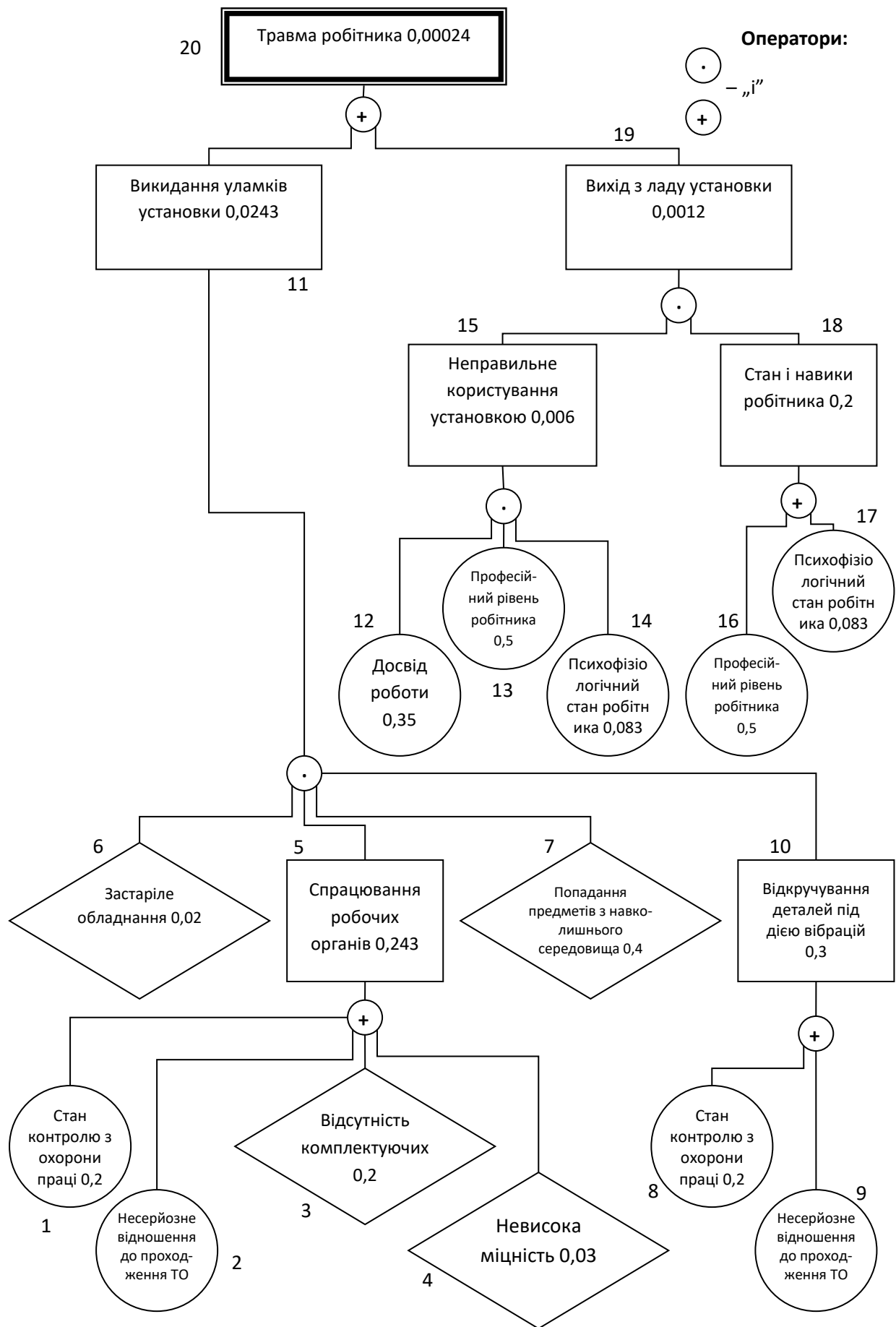


Рисунок 4.1. - Логіко-імітаційна модель процесу формування та виникнення аварії та травми під час виготовлення зварних з'єднань.

Так, поступово обчислюючи ймовірність вихідних подій кожного окремого розгалуження, наближаємось до головної події і обчислюємо ймовірність її виникнення.

Значення ймовірності головних подій, що досліджуються, на жаль, не можна порівняти з нормативними значеннями певного ступеня ризику для певної людино-машинної системи, бо таких даних просто не існує. Але значення ймовірності тієї чи іншої події, обчислені при дослідженні конкретної моделі, дає уяву про високу, середню і незначну (малоймовірну) небезпеку.

Єдиний документ, який можна взяти для орієнтиру, це ГОСТ 12.1.010-76, в якому зазначено, що виробничі процеси повинні розроблятися так, щоб ймовірність виникнення вибуху на будь-якій вибухонебезпечній ділянці протягом року не перевищувала 10^{-6} ($P=0,000001$).

Для проведення обчислень ймовірності травми використаємо логіко-імітаційну модель процесу її формування.

Оскільки значення ймовірності виникнення аварії або травми (аварійної чи травмонебезпечної ситуації) найбільш точно і об'єктивно характеризує рівень небезпеки на конкретному об'єкті, то цим створені умови для удосконалення системи управління безпекою праці в окремих підрозділах або господарствах. При цьому значення ймовірності можуть бути використані при розробці заходів впливу на працюючих, що часто допускають небезпечні дії, і заохочуючих (стимулюючих) заходів до тих працюючих, на робочих місцях яких існує дуже низька ймовірність виникнення травми або аварії.

Наведемо приклад визначення ймовірності аварії за допомогою логіко-імітаційної моделі (рис. 4.1).

Позначимо події моделі відповідними номерами від 1 до 13. Подія 9 характеризує саме аварію. Ймовірності базових подій покажемо умовно, але значення їх будуть близькими до реальних умов виробництва.

$$P_1=0,05; P_2=0,2; P_3=0,3; P_5=0,1; P_7=0,5; P_8=0,5.$$

Використовуючи указану модель, визначимо послідовно ймовірність події 3:

$$P_4 = P_1 + P_2 + P_3 - P_1 P_2 - P_1 P_3 - P_2 P_3 + P_1 P_2 P_3 = 0,243;$$

$$P_6 = P_4 P_5 = 0,0243;$$

$$P_9 = P_6 P_7 P_8 = 0,006.$$

Одержане значення ймовірності виникнення аварії $P_9 = 0,006$, характеризує те, що при наявності таких подій, які відображені у моделі, на кожну 1000 одиниць аналогічного обладнання можна очікувати 6 аварій.

Якщо продовжити розрахунки далі, то можна розрахувати ймовірність травми:

$$P_{10} = 0,2; P_{12} = 0,2;$$

$$P_{11} = P_9 P_{10} = 0,0012;$$

$$P_{13} = P_{11} P_{12} = 0,00024.$$

Логіко-імітаційні моделі аварій і травм допомагають зменшити ймовірність виникнення аварійних та травмонебезпечних ситуацій.

4.3. Вимоги до організації робочого місця зварника

- Робоче місце повинно бути чистим, сухим і добре освітленим (не менше 300 лк).
- Підлога має бути електроізоляційною (гумові килимки, дерев'яні настили).
- Зварювальні установки повинні мати захисні кожухи на рухомих частинах і бути заземлені.
- У зоні зварювання необхідно забезпечити місцеву вентиляцію — витяжний зонт або гнучкий відсмоктувач, який видаляє гази безпосередньо від стику.
- Усі електричні з'єднання, кабелі, клеми мають бути справними, ізоляція — непошкодженою.
- На робочому місці повинна бути аптечка першої допомоги та вогнегасник (вуглекислотний або порошковий).

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

Кожен працівник зварювальної дільниці повинен бути забезпечений такими засобами індивідуального захисту:

- ☐ Спецодяг із вогнестійкої тканини або шкіри (куртка, штани, фартух).
- ☐ Діелектричне взуття або калоші.
- ☐ Захисні рукавиці з вогнестійкої шкіри.
- ☐ Захисний щиток або маска з світлофільтром DIN 10–12.
- ☐ Респіратор або маска для захисту від диму (тип P2 або P3).
- ☐ Захисні окуляри для шліфування поверхонь.

ЗІЗ повинні відповідати вимогам ДСТУ EN ISO 11611:2016 та перевірятись перед кожним використанням.

4.4. Протипожежна безпека

Контактне зварювання пов'язане з високими температурами, тому дільниця повинна бути обладнана засобами пожежогасіння:

- ☐ не менше 2 вогнегасників на кожні 100 м² площі;
- ☐ пожежні щити із лопатами, піском, кошмою;
- ☐ система пожежної сигналізації;
- ☐ заборона зберігання горючих матеріалів (папір, мастила, деревина) ближче ніж 5 м від зони зварювання.

У разі займання необхідно негайно відключити живлення, повідомити керівника робіт і застосувати найближчий вогнегасник.

Санітарно-гігієнічні умови

Під час роботи утворюються пари металів і оксидів, що можуть бути шкідливими. Концентрація шкідливих речовин у повітрі не повинна перевищувати гранично допустимих концентрацій (ГДК), визначених ДСН 3.3.6.042-99.

Рекомендовано:

- ☐ перерви для відпочинку кожні 2 години;

- щоденне вологе прибирання робочої зони;
- контроль рівня шуму (≤ 80 дБ) і мікроклімату ($t = 18\text{--}22$ °С, вологість 40–60 %).

4.5. Безпека в надзвичайних ситуаціях

4.5.1. Загальні положення

Безпека в надзвичайних ситуаціях (НС) є важливою складовою системи охорони праці та цивільного захисту. Відповідно до Кодексу цивільного захисту України (2012 р.) надзвичайна ситуація — це обстановка на певній території або об'єкті, що характеризується порушенням нормальних умов діяльності людей, спричинена аварією, катастрофою, пожежею, вибухом, стихійним лихом або іншими небезпечними подіями, які можуть призвести до загибелі людей, пошкодження майна чи довкілля.

На підприємствах машинобудівного профілю, де проводяться зварювальні роботи, до найбільш імовірних надзвичайних ситуацій належать:

- пожежі та загоряння внаслідок короткого замикання або розбризкування розплавленого металу;
- ураження працівників електричним струмом;
- вибухи балонів із стисненими або горючими газами (у разі газового зварювання);
- витоки охолоджувальної рідини, мастил чи газів;
- травми від рухомих елементів обладнання;
- аварійні відключення електроживлення та вихід з ладу систем вентиляції.

Організація системи безпеки має забезпечувати попередження виникнення НС, оперативне реагування, локалізацію наслідків та захист персоналу.

4.5.2. Профілактичні заходи

Основним напрямом запобігання надзвичайним ситуаціям є профілактика.

Для цього на зварювальних дільницях впроваджуються такі заходи:

1. Технічна профілактика:

- справність усіх зварювальних апаратів, кабелів, трансформаторів;
- регулярне вимірювання опору ізоляції;
- наявність справних систем заземлення;
- перевірка стану вентиляції, освітлення, захисних кожухів.

2. Організаційна профілактика:

- проведення інструктажів з охорони праці та навчань з дій у разі НС не рідше одного разу на пів року;
- розроблення плану ліквідації аварійних ситуацій (ПЛАС);
- призначення відповідальних осіб за електробезпеку, пожежну безпеку та першу допомогу;
- чітке маркування евакуаційних шляхів і встановлення світлових покажчиків “Вихід”.

3. Санітарно-технічна профілактика:

- забезпечення вентиляції, яка видаляє дим і гази, щоб уникнути задимлення в разі аварії;
- утримання вогнегасників, пожежного інвентарю та аптечок у справному стані.

4.5.3. Дії персоналу при виникненні надзвичайної ситуації

У разі виникнення будь-якої НС працівник повинен діяти відповідно до інструкції з охорони праці та плану евакуації, розробленого для зварювальної дільниці.

1. При виникненні пожежі або загоряння:

- негайно припинити зварювання, вимкнути зварювальний апарат з мережі, перекрити подачу струму;
- повідомити керівника робіт або чергового майстра;

- використати найближчий вогнегасник (вуглекислотний або порошковий) для гасіння займання;
- у разі загрози поширення вогню — викликати пожежну службу (тел. 101);
- при евакуації не користуватися ліфтами, рухатись згідно зі схемою, розміщеною на стендах у цеху.

2. При ураженні електричним струмом:

- негайно знеструмити установку, вимкнувши рубильник або від'єднавши кабель;
- звільнити потерпілого від дії струму, дотримуючись правил електробезпеки (використовувати суху дерев'яну палицю, мотузку, гумові рукавички);
- перевірити свідомість і дихання потерпілого;
- при необхідності виконати штучне дихання або непрямий масаж серця;
- викликати медичну допомогу (тел. 103).

3. При витоку охолоджувальної рідини або газу:

- негайно перекрити джерело подачі рідини чи газу;
- вимкнути обладнання;
- провітрити приміщення, увімкнути вентиляцію;
- повідомити відповідального за охорону праці та не допускати сторонніх осіб до місця аварії.

При механічних травмах:

- зупинити машину;
- звільнити постраждалу кінцівку, накласти стерильну пов'язку;
- у разі кровотечі — накласти джгут вище місця поранення;
- повідомити керівника та викликати швидку допомогу.

4.5.4. Евакуація та ліквідація наслідків

На кожній виробничій ділянці має бути план евакуації, де зазначені основні та запасні виходи, місце збору персоналу, маршрути руху. Евакуаційні шляхи повинні бути вільними, освітленими, позначеними

світловими показниками. Відповідальна особа зобов'язана перевіряти доступність евакуаційних виходів щоденно перед початком зміни.

Після локалізації аварії проводиться:

- огляд місця події, фіксація причин виникнення;
- складання акта розслідування нещасного випадку або аварії;
- відновлення працездатності обладнання тільки після дозволу комісії з охорони праці.

Висновки до розділу

1. Виконання вимог охорони праці забезпечує безпечні умови роботи на зварювальній ділянці.

2. Застосування ЗІЗ, вентиляції та протипожежного обладнання знижує ризик травматизму.

3. Дотримання правил електробезпеки — головна умова недопущення ураження струмом.

4. У разі надзвичайної ситуації необхідно діяти за встановленим планом евакуації та оповіщення.

5. Реалізація зазначених заходів гарантує безпечне проведення експериментальних робіт із дослідження міцності стикових зварних з'єднань арматури.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

Практичний досвід експлуатації елементів та вузлів залізобетонних конструкцій свідчить, що при тривалій дії статичних навантажень вони поступово втрачають свою працездатність або навіть руйнуються. Основними причинами цього є зниження фізико-механічних властивостей матеріалу, залишкові напруження, які утворюються в арматурних прутках після попереднього деформування, а також вплив температурних коливань, динамічних ударів і вібрацій. Тому забезпечення надійності таких конструкцій потребує комплексного підходу до оцінки їх міцності та тріщиностійкості.

Аналіз процесів руйнування конструкційних матеріалів показує, що найуразливішими зонами є ділянки з різкими концентраторами напружень і зниженими показниками пластичності та міцності. Це особливо актуально для термонапружених арматурних сталей, що застосовуються у залізобетонних елементах, та для стикових зварних з'єднань, які часто є місцем зародження мікротріщин. У зв'язку з цим виникає необхідність у розробленні вдосконалених методів оцінки їхньої міцності й довговічності.

У роботі здійснено аналіз існуючих підходів і методик оцінки міцності зварних з'єднань арматурних стрижнів, а також досліджено різні варіанти конструкцій лабораторних зразків з обґрунтуванням схем їх навантаження. Наведено типові приклади зразків, які використовуються у практиці випробувань конструкційних та термонапружених сталей, і проведено патентний пошук сучасних варіантів стикових з'єднань арматури, що дозволило визначити найбільш ефективні рішення.

У роботі запропоновано методику автоматизованого формування кільцевого шва шляхом кругового заплавлення матеріалом, що досліджується, у малогабаритному циліндричному зразку, виготовленому на модернізованому зварювальному автоматі типу А-825М. Розроблена

технологія забезпечує високу стабільність процесу зварювання та дозволяє отримати якісні зразки для випробувань тріщиностійкості металу шва.

Стикове контактне зварне з'єднання арматури застосовуються у заводських умовах, а останнім часом і в умовах будівельного майданчика, для з'єднання арматурних стержнів при їх заготовці для подальшої безвідходної різки, а також для застосування залишків арматури, які для окремих конструкцій, зокрема колон і пілонів монолітних будівель досягають 20-25%.

Встановлено, що руйнування стикового контактного з'єднання арматури класу A500C всіх діаметрів, від 12 до 18 мм, і марок сталі, відбувається в зоні термічного впливу і має пластичний характер.

В результаті проведених досліджень отримані експериментальні дані щодо міцності стикового контактного зварного з'єднання арматури класу A500C для всієї номенклатури діаметрів і марок сталі, що виробляються в Україні. Встановлено, що зниження міцності після зварювання становить у середньому 15–20 %, що пояснюється впливом термічного циклу, рекристалізацією металу та зміною структури в зоні шва. Попри це, отримані значення задовольняють вимоги рівноміцності ($k \geq 0.8$), а зварні з'єднання арматури можуть бути рекомендовані для практичного використання у будівельних залізобетонних конструкціях. Найменше розсіювання результатів спостерігається для Ø18 мм, що підтверджує оптимальність технологічного режиму для великих діаметрів.

Приведені заходи по охороні праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях при виготовленні та визначенні міцності зварних з'єднань арматурних стрижнів. Розроблена логіко-імітаційна модель аварій і травм, яка допомагає зменшити ймовірність виникнення аварійних та травмонебезпечних ситуацій. Порахована економічна ефективність роботи, яка свідчить про перспективність застосування у виробництві даного технічного рішення.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Андрейків О. Є. Узагальнена модель пружно-пластичного тіла з тріщиною / О. Є. Андрейків, І. М. Панько // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1995. – № 6. – С. 73 – 80.
2. Бакши О. А. О расчетной оценке прочности сварных соединений с мягкой прослойкой / О. А. Бакши, Р. З. Шрон // Сварочное производство. – 1997. – № 3. – С. 3 – 5.
3. Гнідець Б. Г. Залізобетонні конструкції з електротермічним попереднім напруженням / Б. Г. Гнідець, П. П. Завадяк, М. Р. Щеглюк. – К. : Техніка, 1996. – 240 с.
4. Гуменюк Р. В. Вплив діаметра та довжини на коливання температури для термонапруженої арматури із сталей 35ГС і 25Г2С / Р. В. Гуменюк, М. С. Когут // Матеріали всеукраїнської наук.-практ. конференції молодих учених, аспірантів і студентів "Підвищення надійності та міцності деталей при ремонті з використанням перспективних методів зміцнення" : МНАУ. 25 – 26 вересня 2013. – С. 87 – 90.
5. Гуменюк І.В., Іваськів О.В., Гуменюк О.В. Технологія електродугового зварювання: Підручник. Київ: Грамота, 2006. – 512 с.
6. Ігнатишин М. І. З'єднання арматури періодичного профілю у залізобетонних конструкціях / М. І. Ігнатишин, М. М. Гвоздюк // Зб. наук. пр. Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – Львів : Каменяр, 2004. – Вип. 6. С. 42 – 47.
7. Когут М. С. Визначення тріщиностійкості (K_{IC}) металу шва сталюї термонапруженої арматури на циліндричному зразку з кільцевою тріщиною / М. С. Когут, Р. В. Гуменюк // MOTROL. Commission of Motorization and energetics in agriculture. – 2012. – Vol. 14, № 4. – S. 28 – 31.
8. Когут М. С. Тріщиностійкість прутків арматурних сталей з електротермічним попереднім напруженням / М. С. Когут, Р. В. Гуменюк //

Наукові нотатки міжвузівського збірника (за напрямом „Інженерна механіка”) ЛНТУ. – 2009. – № 25, ч. 1. – С. 176 – 182.

9. Когут М. С. Тріщиностійкість термонапруженої арматури і вплив на неї коливань температури / М. С. Когут, Р. В. Гуменюк // Проблеми міцності. – 2011. – № 5. – С. 82 – 89.

10. Лучко Й. Й. Дослідження міцності арматурного прокату із серпоподібним профілем / Й. Й. Лучко, І. В. Мельник, С. Т. Штаюра // Зб. наук. пр. Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – Львів : Каменяр, 2004. – Вип. 6. – С. 82 – 86.

11. Лучко Й. Й. Оцінка працездатності втулкового з’єднання арматурних стержнів / Й. Й. Лучко, Я. Л. Іваницький, М. М. Гвоздюк // Зб. наук. пр. Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – Львів. – 2003. – С. 137 – 145.

12. Лучко Й. Й. Тріщиностійкість однорідних і неоднорідних стикових зварних з’єднань / Й. Й. Лучко, М. С. Когут, Я. А. Громко // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. □ Львів : Каменяр, 2005. – Вип. 7. □ С. 121 – 133.

13. Матеріалознавство і ТОМ / Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт студентами ОС «Бакалавр» спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія», 274 «Автомобільний транспорт» / [уклад.: А.П. Пахолук, Р.В. Гуменюк, В.В. Буртак];- Львів: ЛНАУ, 2017. - 54с.

14. Охорона праці (гігієна праці та виробнича санітарія): навчальний посібник / Пістун І.П., Березовецький А.П., Тимочко В.О., Городецький І.М.; за ред. І.П.Пістуна. Львів: Тріада плюс, 2017. Ч.І. 620 с.

15. Охорона праці (гігієна праці та виробнича санітарія): навчальний посібник / Пістун І.П., Тимочко В.О., Городецький І.М., Березовецький А.П.; за ред. І.П.Пістуна. Львів: Тріада плюс, 2015. Ч.ІІ. 224 с.

16. Пат. 63168А Україна, ПМК Е 04 С 5/03. Спосіб з'єднання арматурних стержнів періодичного профілю та пристрій для його реалізації / Й. Й. Лучко, Я. Л. Іваницький, С. Т. Штаюра, М. І. Ігнатишин. – опубл. 15.01.2004, Бюл. № 17.
17. Пат. 83692 Україна, МПК Е 04 С 5/03. Спосіб з'єднання арматурних стержнів з періодичним реберним профілем / М. С. Когут, Р. В. Гуменюк. – опубл. 25.09.2013, Бюл. № 18.
18. Технологія зварювання металів і пластмас. Конспект лекцій для студентів ОС «Бакалавр» спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія», 274 «Автомобільний транспорт», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (Частина 1) / [уклад.: О. П. Швець];- Львів: ЛНАУ, 2017. - 78 с.
19. Технології та обладнання зварювання металів і пластмас: Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи на тему «Зварювання сталей в середовищі вуглекислого газу» студентами ОС «Бакалавр» спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 208 «Агроінженерія», 274 «Автомобільний транспорт» / [уклад.: О. П. Швець, С.А. Березовецький];- Львів: ЛНАУ, 2020. - 10 с.
20. Тимочко В.О., Городецький І.М., Березовецький А.П., Мазур І.Б. та ін. Безпека життєдіяльності та охорона праці. Навч. посібник. Львів: Сполом. 2022. 376 с.
21. Adevara D. O. Mechanism of crack initiation in as Cast Ductile Iron / D. O. Adevara, C. P. Loper // American Lountrumenis Society Cast Metals Resenrech Journal. – 1975. – Vol. 11, N 4. – P. 104 – 108.
22. Prokhorenko S. Studying of thermal and mechanical stresses by AE method / S. Prokhorenko, M. Buzansky, S. Filonenko // Sci. Bull. Rzesow Univ. of Technology Mechanics 54. – Mechanica 2000. – № 179. – P. 307 – 311.
23. The engineering treatment model // Jnt. J. Press. Vess. Piping. – 2000. – P. 905 – 981.

24. Skelton P. P. Engenary criteria and cumulative damage during fatigue crack growt / P. P. Skelton, T. Vilhelmsent, G. A. Webster // Int. J. Fatigue. – 1998. – Vol. 20, № 9. – P. 641 – 649.
25. Draft for Development, 3.1971. Method for Plane-Strain Fracture Toughness (K_{IC}) Testing-British Standarts Institution. London. – 1971. – 20 p.
26. Yang C. Design and analysis of composite pipe joints under tensile loading / C. Yang // J of Composite Materials. – 2000. – 34, № 4. – P. 332 – 349.
27. <http://uapatents.com/metka/kormiv/page/2>
28. <http://lnau.edu.ua/lnau/index.php/uk/f-s/mex/navplanmeh261015/6535-navplangm1920bak.html>
29. <http://bctp.knuba.edu.ua/article/view/260028>