

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЛЯТУРИНСЬКИЙ ВАСИЛЬ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.874: 539.3

**ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОЯСНИХ ЗВАРНИХ
З'ЄДНАНЬ КОРОБЧАСТИХ БАЛОК МОСТОВИХ КРАНІВ
КОНСТРУКТИВНИМИ І ТЕХНОЛОГІЧНИМИ СПОСОБАМИ**

05.05.05 – піднімально-транспортні машини

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Запорізькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент
Сидоренко Михайло Володимирович,
Запорізький національний технічний університет,
доцент кафедри Деталей машин і підйомно-транспортних механізмів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Ракша Сергій Васильович,
Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна,
завідувач кафедри Прикладної механіки та матеріалознавства

кандидат технічних наук, доцент
Немчук Олексій Олегович,
Одеський національний морський університет,
проректор з наукової роботи

Захист відбудеться “26” травня 2017 р. о 14 — годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.052.02 в Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, проспект Шевченка, 1, ауд. 400-а.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеського національного політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, проспект Шевченка, 1

Автореферат розісланий “14” квітня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 41.052.02



А.О. Бойко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Випуск конкурентоспроможної продукції кранобудування в Україні сьогодні стримується відставанням рівня її якості та технологічності від аналогів провідних зарубіжних виробників. Вирішення зазначеної проблеми потребує підвищення наукомісткості галузі. Металеві конструкції вантажопідйомних кранів формують основну частину вартості та здебільшого лімітують їх надійність та довговічність. Джерелами виникнення руйнувань металевих конструкцій вантажопідйомних кранів переважно виявляються ділянки високих залишкових напружень їх зварних з'єднань.

На підприємствах машинобудування, металургії та енергетики найбільше поширення отримали мостові крани з коробчастими пролітними та кінцевими балками. Перспективним напрямом підвищення надійності та довговічності кранових коробчастих балок є застосування заходів по регулюванню залишкового напружено-деформованого стану їх зварних з'єднань на етапах проектування та виготовлення. Цей стан, в більшості випадків, є недостатньо відомим. Однак сучасний рівень розвитку методик визначення залишкових напружень в зварних з'єднаннях вже дає можливість проводити як кількісні експерименти, так і достатньо точні розрахунки чисельними методами.

Таким чином, актуальним є комплексне дослідження післязварного напружено-деформованого стану коробчастих кранових балок, з урахуванням їх технологічних та конструктивних параметрів, та його оптимізація технологічними і конструктивними способами, що дозволить підвищити межу витривалості, запас пластичності та загальний технічний рівень цих вузлів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота відповідає науковим напрямам кафедри Деталей машин і підйомно-транспортних механізмів Запорізького національного технічного університету.

Мета і задачі дослідження. Мета – підвищення межі витривалості та пластичності поясних з'єднань коробчастих балок мостових кранів шляхом оптимізації їх післязварного напружено-деформованого стану за рахунок раціонального сполучення конструктивних та технологічних параметрів.

Для досягнення зазначеної мети поставлені такі задачі:

- проаналізувати стан розробки проблеми несприятливого технологічного напружено-деформованого стану поясних з'єднань коробчастих балок мостових кранів;
- обґрунтувати методику експериментального визначення залишкових напружень в зварних з'єднаннях та розробити експериментальну установку для дослідження дійсного напруженого стану зварних з'єднань;
- обґрунтувати методику чисельного моделювання післязварного стану зварних з'єднань, що дозволить отримати достовірні результати в зонах термічного впливу, провести верифікацію та оптимізацію методики;
- за допомогою чисельних та натурних експериментів дослідити технологічний напружено-деформований стан поясних з'єднань коробчастих балок, виконаних односторонніми, двосторонніми та криволінійними швами, та побудувати модель

післязварного стану цих з'єднань;

- встановити залежності та закономірності розподілу технологічного напружено-деформованого стану в зварних з'єднаннях кранових коробчастих балок від їх конструктивних параметрів та технології виготовлення;
- дослідити вплив перших циклів експлуатаційного навантаження пролітних коробчастих балок мостових кранів на перерозподіл полів залишкових напружень та пластичних деформацій в поясах з'єднаннях;
- запропонувати критерій оптимізації післязварного стану поясних з'єднань коробчастих балок мостових кранів по супротиву багатоцикловій втомі;
- розробити рекомендації до конструкції та технології виготовлення пролітних та кінцевих коробчастих балок мостових кранів з позиції підвищення межі витривалості та зниження крихкості їх поясних зварних з'єднань.

Об'єкт дослідження – післязварний стан поясних з'єднань коробчастих балок мостових кранів.

Предмет дослідження – закономірності впливу конструктивних та технологічних параметрів кранових коробчастих балок на поля залишкових напружень, деформацій, структур в зонах термічного впливу поясних зварних з'єднань.

Методи дослідження: малоруйнівний механічний метод визначення дійсних напружень свердленням глухого отвору – для аналізу залишкових напружень в зонах термічного впливу зварних з'єднань; чисельний метод кінцевих елементів – для моделювання технологічного стану зварних з'єднань; метод математичного планування експериментів та статистичного опрацювання експериментальних даних; металографічні методи – для дослідження структури зони термічного впливу зварних з'єднань; методи інженерної механіки.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Запропонована теоретична модель післязварного напружено-деформованого стану поясних з'єднань коробчастих кранових балок з односторонніми, двосторонніми та криволінійними швами, яка враховує фазові і структурні перетворення зон термічного впливу низьколегованої сталі, що дозволило локалізувати ділянки несприятливого сполучення технологічних напружень, пластичних деформацій та крихких структур в цих з'єднаннях, та дало змогу обґрунтувати набір значущих параметрів технологічного стану з'єднань коробчастих балок для здійснення оптимізації.
2. Отримано емпіричні залежності та закономірності впливу параметрів технології виготовлення (швидкість зварювання, напрям накладання валиків, інтервали часу між накладанням валиків, режими підігріву) та конструкції коробчастих балок мостових кранів на післязварний напружено-деформований стан їх поясних з'єднань, що дозволяє оптимізувати цей стан на етапі проектування та виробництва балок.
3. Встановлено емпіричні закономірності перерозподілу залишкових напружень та пластичних деформацій поясних з'єднань коробчастих балок при перших циклах навантаження мостових кранів, що дозволило висунути новий критерій оцінки їх напружено-деформованого стану – кінцеву межу текучості ділянки максимальних залишкових напружень після максимального експлуатаційного

навантаження, що комплексно врахує вплив стану зварних з'єднань на межу витривалості вказаних вузлів.

4. З урахуванням умов навантаження та технологічного стану прольотних коробчастих балок мостових кранів, отримано дійсні характеристики циклів напружень їх верхніх та нижніх поясних з'єднань, що дозволяє використовувати методи розрахунку зварних металоконструкцій на довговічність з врахуванням залишкових напружень.

5. Удосконалено теоретичну модель межі витривалості зварних з'єднань, яка дозволила виокремити та обґрунтувати найбільш ефективні напрями оптимізації напружено-деформованого стану поясних з'єднань коробчастих кранових балок шляхом формування сприятливого сполучення їх конструктивних та технологічних параметрів.

Практичне значення одержаних результатів:

- Розроблено науково-обґрунтовані конструктивні та технологічні рекомендації, що дозволяють до 1,23 раз підвищити межу витривалості поясних з'єднань коробчастих балок мостових кранів, зокрема рекомендації до: товщин елементів, конструкції діафрагм та кронштейнів, геометрії балок змінної висоти перетину, геометрії з'єднань, швидкості та порядку накладання валиків швів, технології підігріву та післязварної обробки з'єднань.
- Отримано характеристики дійсних циклів напружень верхніх та нижніх поясних з'єднань коробчастих балок мостових кранів, що враховують рівень залишкових напружень та пластичні деформації перших циклів експлуатації.
- Створено експериментальну установку для визначення залишкових або дійсних напружень методом свердлення глухого отвору, що використовується для наукових досліджень та в навчальному процесі Запорізького національного технічного університету.
- Розроблено рекомендації до визначення напружень методом свердлення глухого отвору та запропоновано поправки до відповідної методики (ASTM E 837-08), що дозволило до 20% підвищити точність визначення залишкових напружень в зонах термічного впливу таврових зварних з'єднань.
- Розроблено практичні рекомендації до чисельного моделювання післязварного стану металевих конструкцій з низьколегованих сталей, що дозволяє отримувати достовірні результати в широкому діапазоні граничних умов.

Висновки й практичні рекомендації, сформульовані в дослідженні, **впроваджено** на профільних підприємствах: ТОВ «Завод підйомних машин та металевих конструкцій», ТОВ «Бюро «Інженербуд»», ТОВ «Монтажспецкран» та в навчальному процесі Запорізького національного технічного університету.

Особистий внесок здобувача. Всі теоретичні та експериментальні дослідження за темою дисертаційної роботи виконані здобувачем особисто. Основні розробки та пропозиції, в тому числі ті, що формують наукову новизну та практичне значення, отримані автором самостійно.

В роботах, виконаних у співавторстві, здобувачу належить: кінцево-елементний аналіз напружено-деформованого стану пролітної будови мостового

крану за різних типів навантажень та порівняльний аналіз результатів [1]; обґрунтування методики свердлення глухого отвору для дослідження залишкових напружень металевих конструкцій та пов'язані із цим моделювання деформаційного відгуку контуру отвору [2, 3]; збірка, налагодження та тарування експериментальної установки [3]; дослідження об'єктивності методики експериментального визначення залишкових напружень для поясних зварних з'єднань коробчастих балок та її оптимізація [3]; обґрунтування методики кінцево-елементного моделювання для визначення параметрів напружено-деформованого стану в валиках та зонах термічного впливу зварних з'єднань коробчастих балок та верифікація методики моделювання [4, 5]; дослідження післязварного напружено-деформованого стану зварних з'єднань коробчастих балок методом свердлення глухого отвору і методом кінцевих елементів [4, 5, 6, 7]; рекомендації до конструкції та технологій виготовлення коробчастих балок мостових кранів [4, 5, 6, 7]; рекомендації до експериментального та чисельного дослідження напруженого стану металевих конструкцій вантажопідйомних кранів [4, 5, 6, 7]; узагальнення проведених досліджень [7].

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дослідження оприлюднені, обговорені та отримали позитивну оцінку на: Міжнародних науково-технічних конференціях «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем» (м. Севастополь, 2012, 2013, 2014); XXV міжнародній науково-технічній конференції «Стародубівські читання» (м. Дніпропетровськ, 2015); 12-му міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів, 2015); 9-й міжнародній науково-технічній конференції «Приборостроение – 2016» (м. Мінськ, 2016); Міжкафедральному семінарі Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне, 2014); Засіданнях науково-методичної ради зі спеціальності «Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні, меліоративні машини і обладнання» (м. Харків, 2014; м. Львів, 2015); наукових конференціях «Тиждень науки» (м. Запоріжжя, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016); Засіданнях кафедри «Деталей машин і підйомно-транспортних механізмів» Запорізького національного технічного університету (2012 – 2016 рр.).

Публікації. Основні положення й результати дослідження висвітлено в 16 наукових працях, з яких: 6 – статті в наукових фахових виданнях України, 1 – стаття у виданні, що включено до міжнародних наукометричних баз, 9 – матеріали та тези конференцій і симпозиумів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків до кожного розділу, загальних висновків, списку використаних джерел, п'яти додатків. Загальний обсяг дисертації становить 240 сторінок, з них основний текст – 171 сторінка (6,1 авторських аркушів), перелік посилань (195 найменувань, з них 102 – іноземною мовою) – 20 сторінок, додатки – 16 сторінок. Дисертація містить 15 таблиць, 128 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми; визначено мету, об'єкт, предмет, методи дослідження; викладено наукову новизну та практичне значення

отриманих результатів.

У **першому розділі** – *“Проблематика врахування залишкових напружень та деформацій, що виникають при виготовленні коробчастих балок мостових кранів”* – проведено аналіз впливу наслідків зварювання на несучу здатність кранових металевих конструкцій (МК); розглянуто сучасний стан врахування післязварних напружень та деформацій при проектуванні та виготовленні коробчастих балок (КБ) та шляхів їх регулювання; представлено огляд експериментальних та розрахункових методик визначення залишкових напружень (ЗН) в зварних з’єднаннях; обґрунтовано метод свердлення глухого отвору для визначення ЗН в зонах термічного впливу (ЗТВ) зварних з’єднань кранових МК. На основі проведеного аналізу сформульовані задачі та структура досліджень.

Велика кількість робіт присвячена дослідженню впливу наслідків зварювання на технологічність, статичну міцність і довговічність МК. В цьому контексті, МК вантажопідійомних машин (ВПМ) розглядалися в роботах А.В. Вершинського, К.П. Манжули, М.Р. Нургужина, С.О. Соколова, К. Masubuchi та інших. Більшість досліджень показують що фактори структурних змін, вичерпання пластичності та наявності високих ЗН розтягу негативно впливають на якість та довговічність МК ВПМ та можуть бути знехтувані лише при статичному навантаженні і високій залишковій пластичності зварних з’єднань. Поширені сьогодні методи розрахунку МК ВПМ припускають відсутність технологічних напружень та деформацій конструкції.

В роботах В.М. Юшкевича, Н.О. Кликова пропонуються прогресивні методики розрахунків зварних МК, що враховують дійсний напружено-деформований стан (НДС) зварних з’єднань, але їх використання для розрахунку МК ВПМ, в тому числі КБ, стримується недостатністю даних про післязварний стан конструкцій через його значну залежність від конструктивних та технологічних параметрів.

Сприятливий післязварний стан зварного з’єднання передбачає мінімізацію: рівня ЗН, розміру зерна, концентрації крихких структур, рівня ПД. Оцінка всіх зазначених параметрів НДС можлива лише за деталізації стану ЗТВ з’єднання, з врахуванням наявних фазових і структурних перетворень.

У **другому розділі** – *“Методики проведення експериментальних досліджень”* – представлено методику чисельного моделювання зварювання, устаткування та методику експериментального визначення ЗН свердленням глухого отвору, їх верифікацію.

Деталізація НДС в ЗТВ зварних з’єднань забезпечується за рахунок двоетапного моделювання методом кінцевих елементів. На першому етапі проводиться термічний розрахунок і формуються бази даних по: розподілу температур в процесі зварювання (повна термічна історія); концентрації фаз і структурних складових на кожному кроці моделювання (повна фазово-структурна історія); фізичним і механічним властивостям матеріалу, що залежать від температур та концентрацій фаз і структурних складових. На другому етапі проводиться розрахунок НДС для кожного кроку моделювання.

Особливостями методики моделювання, що забезпечили об’єктивність результатів визначення НДС в шві та ЗТВ поясних з’єднань КБ ВПМ, є:

використання тривимірної двоеліпсоїдної моделі енерговкладання; використання температуро-залежних фізичних і механічних властивостей металу (густини, теплоємності, теплопровідності, питомої ентальпії, модуля пружності, коефіцієнту Пуассона, межі текучості); врахування концентрацій фаз та структурних складових на основі діаграм неізотермічного перетворення переохолодженого аустеніту; врахування енергетики та механіки фазових та структурних перетворень.

Для проведення експериментів було створено установку рис. 1, що дозволяє проводити багатокрокове високошвидкісне (частота турбіни до 350 000 об/хв) свердлення отворів (діаметр до 2,5 мм) із: тензометруванням деформаційного відгуку кромки отвору на кожному кроці свердлення, управлінням та отриманням результатів через АЦП/ЦАП на персональному комп'ютері, програмною обробкою результатів і отриманням величин та орієнтації головних напружень в матеріалі для кожного знятого шару (відповідно – кожного кроку свердлення).

Виокремлено похибки експериментального визначення ЗН в ЗТВ кутових зварних з'єднань, викликані: високими градієнтами ЗН, близькістю величин ЗН до межі текучості металу, близькістю розташування валиків кутових зварних швів, кінцевістю ширини тензорешіток розетки.

Створено рекомендації до експериментального визначення ЗН в ЗТВ кутових та таврових з'єднань, що дозволили на 5...20% підвищити точність результатів в цих зонах.

Доведено, що для використання стандартизованого методу визначення ЗН – ASTM E 837-08 із тензорозетками нестандартних розмірів, достатнім (із похибкою $< 1\%$) є внесення поправочного коефіцієнту k до фізичного радіусу тензорозетки R (рис. 2). Це дозволило розширити коло використовуваних тензорозеток для методу свердлення глухого отвору.

Проведено комплексну верифікацію результатів моделювання післязварного стану зварного з'єднання, зокрема порівнювалися:

- Історія термічного циклу контрольної точки ЗТВ (10 мм від лінії сплавлення) із використанням пірометра «СЕМ DT-8869Н» (рис. 3 а).
- Геометрія зварної ванни моделі та макрошліфу з'єднання.
- Деформації з'єднання, отримані розрахунково та експериментально; розбіжність склала 10%.
- Розподіл ЗН в з'єднанні (рис. 3 б). Розбіжності в цих результатах не перевищують 60 МПа, що можна вважати прийнятним, враховуючи недосконалість експериментальної методики, значну складність моделювання зварювання, високі градієнти ЗН та структур в ЗТВ з'єднань, недосконалість моделей пластичного деформування зміцнених сталей.

У **третьому розділі** – *“Залишковий напружено-деформований стан коробчастих балок мостових кранів”* – Представлено теоретичну модель післязварного стану поясних з'єднання КБ ВПМ, отримано залежності та закономірності розподілу післязварного стану поясних з'єднань від технологічних та конструктивних параметрів КБ.

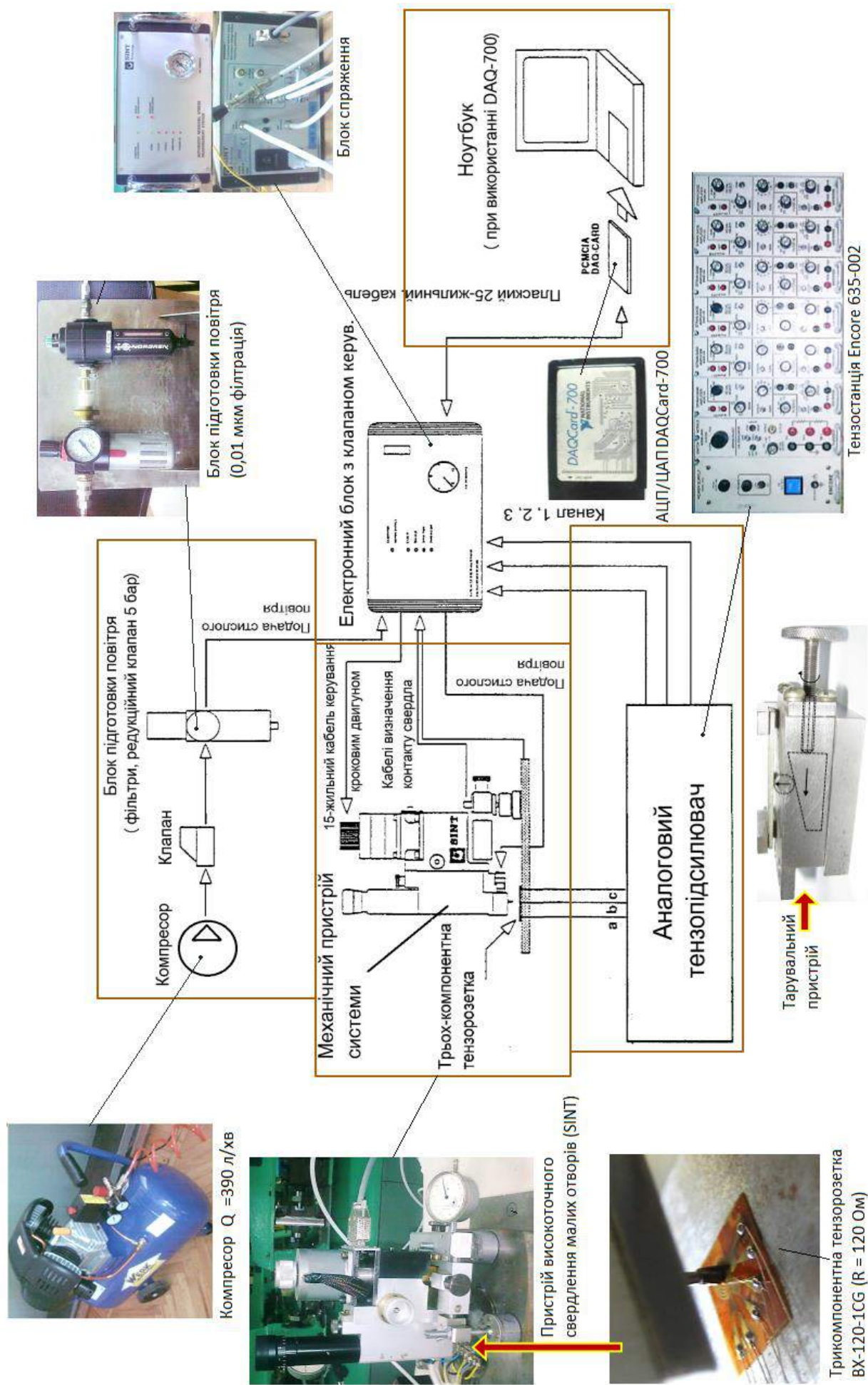


Рисунок 1 – Схема системи вимірювання залишкових напружень методом свердлення глухого отвору

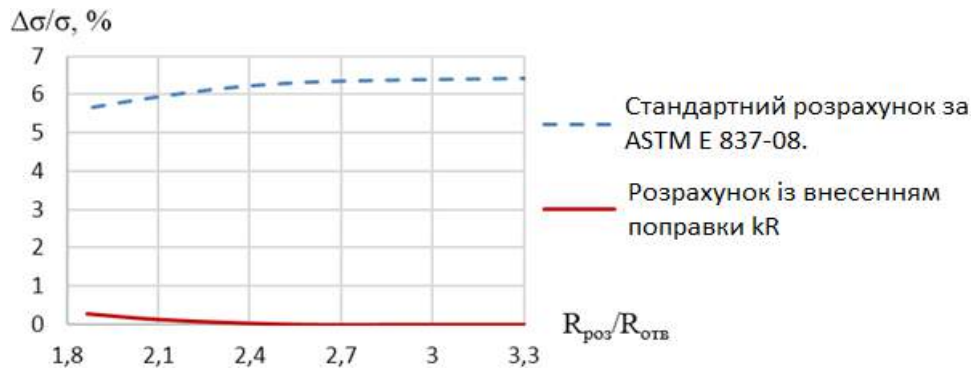


Рисунок 2 – Залежність помилки визначення залишкових напружень $\Delta\sigma/\sigma$ за ASTM E 837-08 від співвідношення радіусів тензорозетки та отвору $R_{\text{роз}}/R_{\text{отв}}$

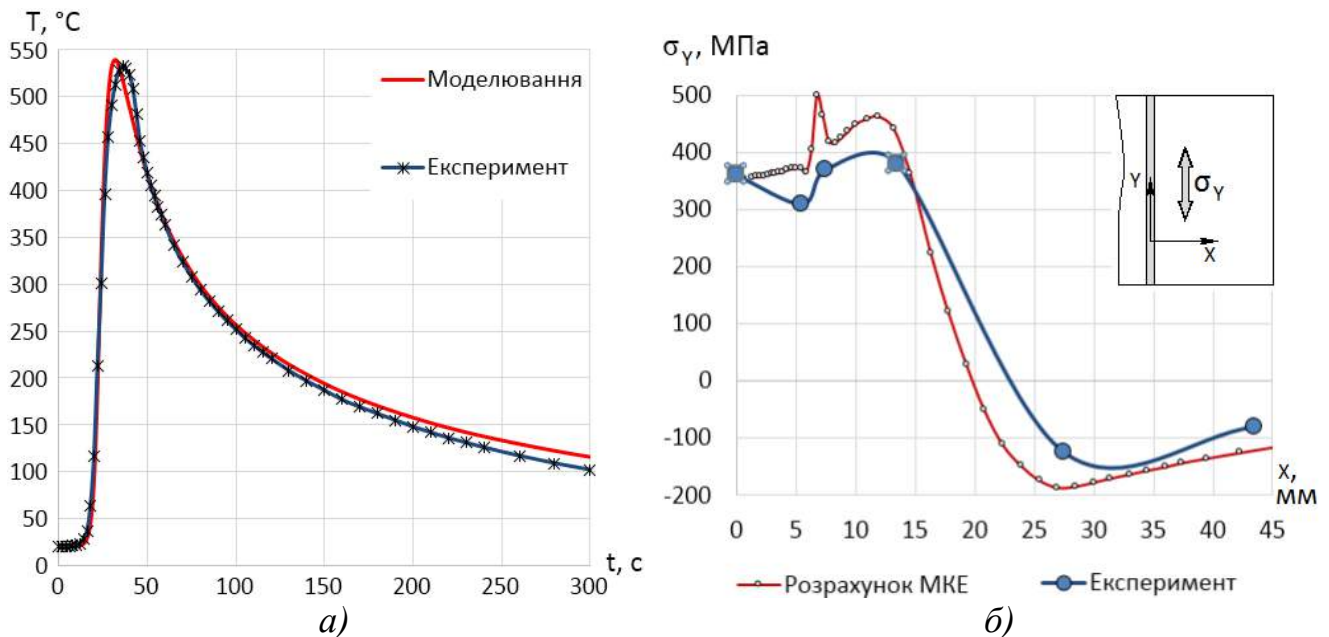


Рисунок 3 – Експериментальна верифікація термічної історії $T(t)$ (а) та повздовжніх залишкових напружень $\sigma_Y(x)$ (б) в зварному з'єднанні

Теоретична модель післязварного стану поясних з'єднань КБ ВПМ, виконаних одностороннім швом, базується на наступних положеннях:

1. Положення екстремумів ЗН та ПД в ЗТВ поясного з'єднання КБ залежить лише від термічної історії і в найбільшій мірі визначається параметром максимальної температури T_{max} , досягнутої при зварюванні. При узагальненні результатів розрахунку 127 моделей, що охоплюють весь інтервал варіювання конструктивних параметрів КБ, було встановлено що: максимальне структурне зміцнення (гартування) наявне в точках найменшої тривалості фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення які відповідають $T_{\text{max}} \sim 1100^\circ\text{C}$; максимальний рівень ЗН наявний в точках найменшої тривалості існування аустеніту які відповідають $T_{\text{max}} \sim 867^\circ\text{C}$; максимальний рівень ПД наявний в найближчих до шву точках, що не зазнавали фазових перетворень ($T_{\text{max}} \sim 727^\circ\text{C}$) (рис. 4, 5).

Довговічність зварного з'єднання головним чином лімітується зонами максимальних ЗН, тому при розрахунках поясних з'єднань КБ ВПМ на витривалість необхідно розглядати точки ЗТВ, що досягали $T_{\text{max}} \sim 867^\circ\text{C}$. Рівень технологічного вичерпання пластичності поясного з'єднання доцільно оцінювати

за ПД ділянки з $T_{\max} \sim 727^\circ\text{C}$, які складаються із високотемпературного пластичного стиску з наступним низькотемпературним пластичним розтягом. Таким чином, можливо від розгляду поля перейти до аналізу встановлених точкових оцінок.

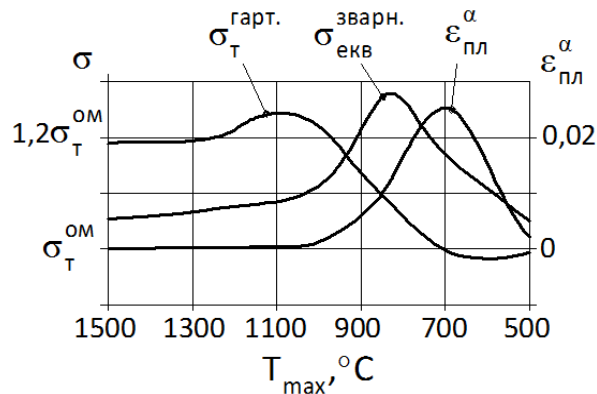


Рисунок 4 – Принципові графіки залежностей рівня еквівалентних післязварних напружень $\sigma_{\text{зварн. екв}}$, зміцнення гартуванням $\sigma_{\text{гарт.}}$ та пластичних деформацій $\epsilon_{\text{пл}}^\alpha$ від максимальної температури $T_{\max}$ ділянки зони термічного впливу поясного зварного з'єднання коробчастої балки з низьколегованої сталі

2. Величини максимальних ЗН та ПД в ЗТВ залежать від режимів нагріву та охолодження і від параметрів геометрії поясного з'єднання, а не від габаритів КБ. Для доведення цього положення було розглянуто НДС ЗТВ поясних з'єднань КБ ВПМ чотирьох габаритів. Встановлено що на моделях $B \times H_{\text{КБ}} > 300 \times 300$ мм (рис. 6), об'єктивний післязварний стан поясного з'єднання КБ не зазнає додаткових змін.

3. Ділянки поясного з'єднання КБ ВПМ що зазнали повного циклу фазових перетворень ($T_{\max} \gg 867^\circ\text{C}$) при усадці здебільшого не досягають межі текучості, тобто мають невичерпаний запас пластичності. Незважаючи на те, що максимальний рівень ПД при зварюванні досягає високих значень (рис. 5 г), більша їх частина відбувається в аустенітні, а наслідки знімаються наступним фазовим $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворенням (рис. 5 л, м). За рахунок конструктивних особливостей КБ та технології виготовлення їх поясних з'єднань, за використання односторонніх швів, усадка після фазового переходу не є достатньою для виникнення ПД цих ділянок (рис. 5 д).

З цього випливає, що для з'єднань кранових балок з низьколегованої сталі критерієм оцінки рівня ПД мають бути лише ті, що відбулася після фазового перетворення – $\epsilon_{\text{пл}}^\alpha$ (рис. 5 д), а не повний рівень ПД $\epsilon_{\text{пл}} = \epsilon_{\text{пл}}^\alpha + \epsilon_{\text{пл}}^\gamma$ (рис. 5 г).

4. Розподіл структур, ЗН та ПД в поясі КБ має радіальний характер, з крутим градієнтом (рис. 5 б, в, д, л, м), що доведено узагальнюючи результати розрахунків поясних з'єднань та за результатами експерименту. Такий характер розподілу обумовлено значною товщиною поясу відносно розміру валику поясного шва. Високі градієнти ЗН та ПД за товщиною (рис. 5 д, ж, з, к, л) демонструють необ'єктивність усереднення НДС поясу КБ в двовимірних кінцево-елементних моделях та доводять необхідність тривимірного моделювання із розбиттям поясу по товщині якнайменш на три кінцеві елементи.

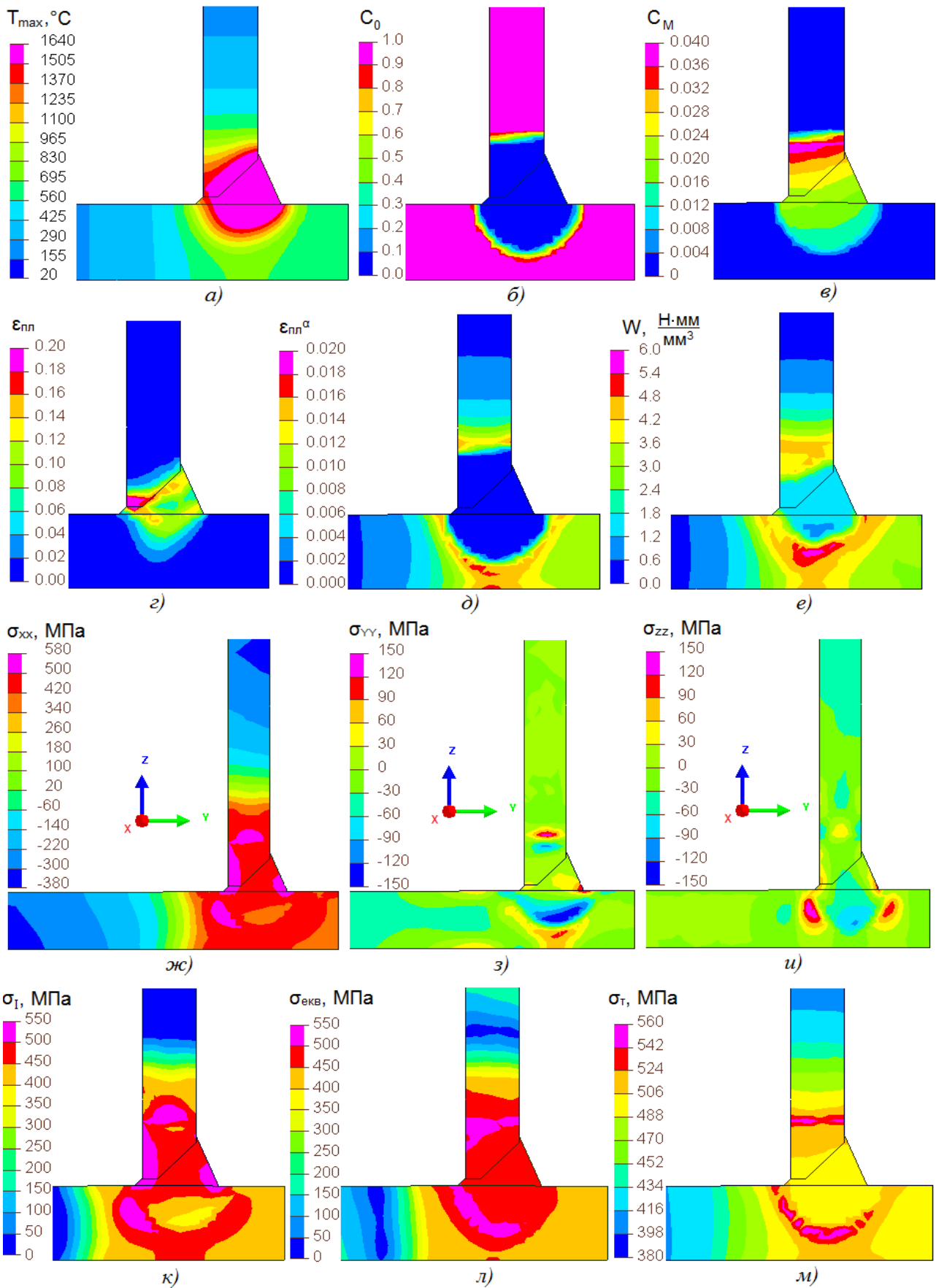


Рисунок 5 – Епюри післязварного стану поясного з'єднання КБ: максимальні температури $T_{\max}$ (а), концентрація початкової структури металу C_0 (б), концентрація мартенситу C_M (в); рівень пластичних деформацій (г), рівень пластичних деформацій α -фази сталі (д), питома енергія деформування (е), нормальні залишкові напруження (ж, з, и), перші головні напруження (к), еквівалентні за Мізесом напруження (л), межа текучості після зміцнення (м)

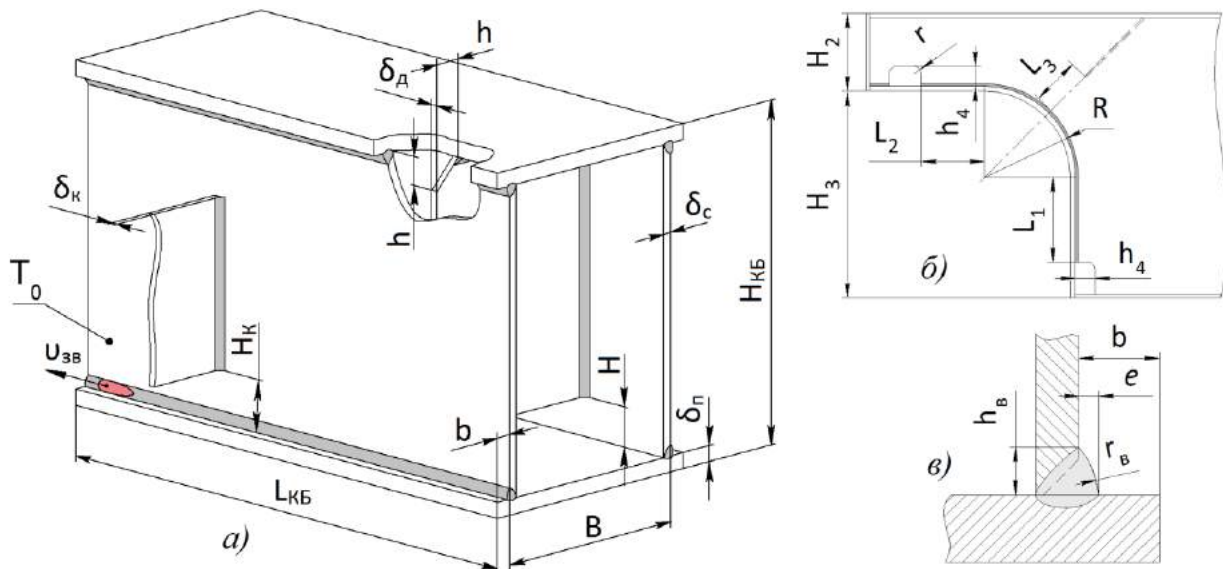


Рисунок 6 – Параметри коробчастих балок мостових кранів

Модель післязварного стану поясного з'єднання, виконаного двостороннім швом, виходить з вищенаведеної, якщо положення 1-4 приймати для останнього з накладених валиків, тобто:

5. *Вирішальний вплив на післязварний НДС має термічний цикл від накладання другого валику для якого діють положення 1-4. Радіальність ЗТВ останнього валику поширюється на перший валик і спричиняє високі ЗН та ПД в зонах геометричної концентрації першого валику.* При накладанні останнього з валиків з'єднання зварна ванна та ділянка $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ перетворень ЗТВ є поміщеною в жорсткий, попередньо зміцнений "холодний" контур, сформований поясом, стінкою та першим валиком, що при наступному остиганні ініціює підвищення рівня та градієнтів ПД і ЗН в з'єднанні в цілому (рис. 7 ж) та в першому валику зокрема. За несприятливих умов рівень ЗН першого валику та зон концентраторів може досягати $1,6\sigma_T$, наближаючись до межі міцності матеріалу. Стан останнього валику є таким, як і в з'єднанні з одностороннім швом.

Для розповсюдження моделі на криволінійне з'єднання (рис. 6 б) необхідно врахувати доповнення:

6. *В стінці КБ змінної висоти на ділянці радіусного переходу з'являються додаткові дотичні ЗН, які компенсуються значними дотичними ЗН протилежного знаку в нижньому поясі та/або безпосередньо в з'єднанні, що залежить від радіусу переходу.* Зміна напрямку траєкторії валику спричиняє двонаправленість усадкового навантаження стінки навпроти радіусного переходу, що, поряд із високою товщиною поясу (надбуксового листа) та жорсткістю контуру КБ змінної висоти, призводить до виникнення значних дотичних напружень рівня $\tau = 150 \dots 300$ МПа (відповідно для $R = 10\delta_{\text{п}} \dots 2\delta_{\text{п}}$) з першим максимумом на відстані $0,4(R+h_{\text{в}})$ від поясу (рис. 6 б) і компенсуючим другим максимумом протилежного знаку безпосередньо в зоні з'єднання. За рахунок цього рівень ПД та $\sigma_{\text{екв}}$ є вищим ніж на прямолінійних ділянках і має оцінюватися не тільки в ЗТВ з'єднання, а і в стінці балки вздовж бісектриси кута переходу. Рівень повздовжніх валику ЗН в зоні переходу є до 20% меншим ніж на прямолінійних ділянках, але їх відокремлений розгляд тут не є достатнім.

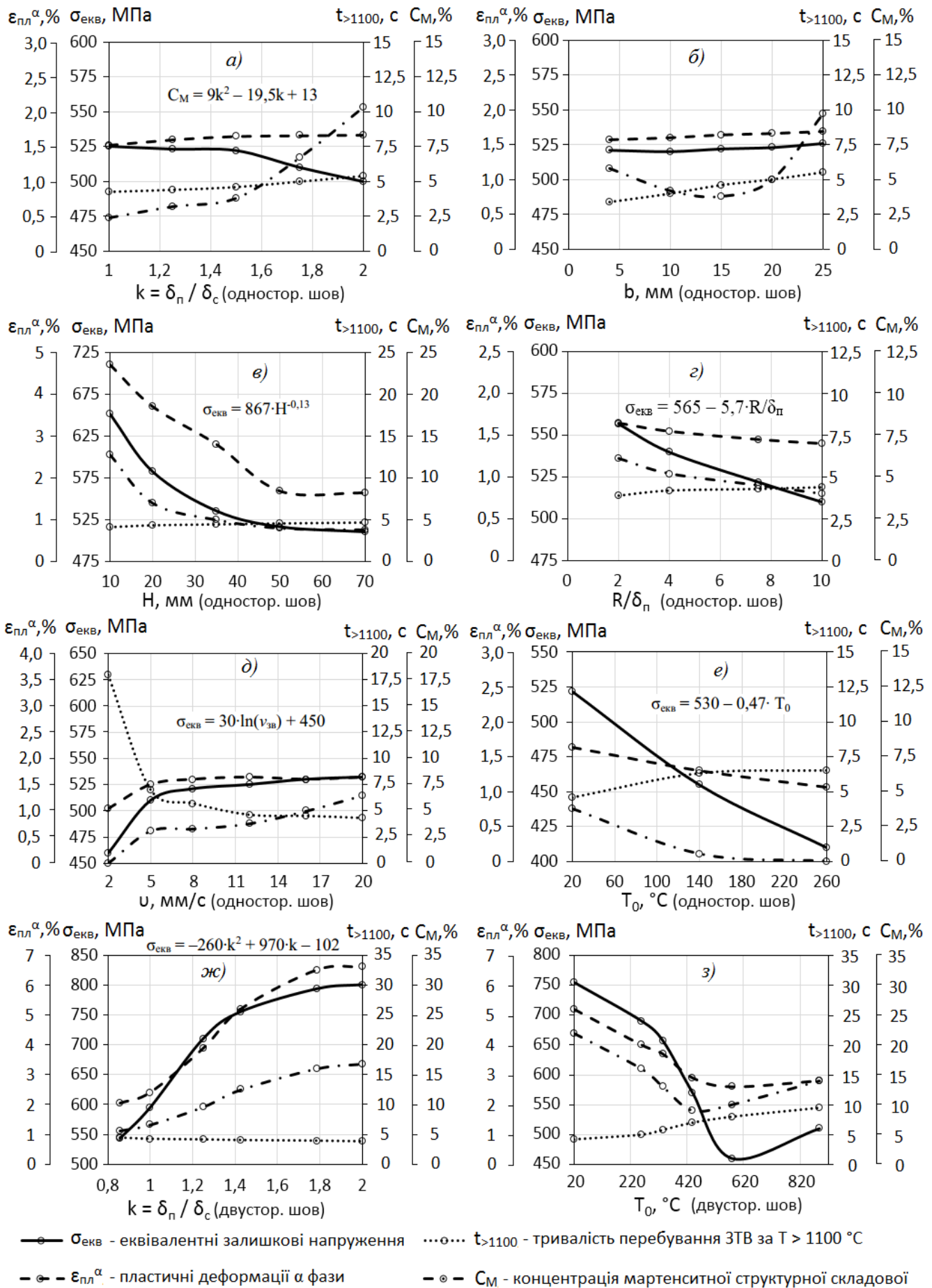


Рисунок 7 – Графіки залежностей параметрів післязварного стану ЗТВ поясного з'єднання коробчастої балки від конструктивних та технологічних факторів

Досліджено вплив на післязварний НДС КБ ВПМ конструктивних (рис. 6) та технологічних параметрів: швидкості зварювання $v_{зв}$, температури дозварного підігріву T_0 , режиму післязварного підігріву, кількості наплавленого металу. Проведено ранжування рівнів значимості факторів оптимізації за $x = 0,05$, для найбільш вагомих з них отримано емпіричні залежності параметрів НДС ЗТВ поясних з'єднань КБ від їх значень (рис. 7).

Доведено, що для поясного з'єднання КБ, виконаного одностороннім швом, товщина поясу $\delta_{п}$, товщина стінки δ_c та швидкість зварювання в діапазоні $v_{зв} = 5...12$ мм/с, мало впливають на НДС (рис. 7 а, б), що дозволяє поширити представлену модель післязварного стану КБ та наступні закономірності на будь-які типові КБ ВПМ.

Закономірності розподілу НДС в ЗТВ поясних з'єднань КБ, виконаних одностороннім швом, полягають в наступному:

- Зварні валики поясних з'єднань характеризується на 20...35% підвищеною за основний метал межею текучості σ_T (рис. 5 м), нижчим ніж в ЗТВ рівнем ЗН (рис. 5 к, л), відсутністю ПД після фазового перетворення $\epsilon_{пл}^a$ (рис. 5 д), меншою ніж в ЗТВ концентрацією мартенситної структури S_M (рис. 5 в), що з позиції залишкового стану дозволяє вважати їх менш схильними до руйнування ніж ЗТВ поясних з'єднань КБ.

- Деформаційний цикл ділянок ЗТВ поясних з'єднань з $T_{max} = 727...867$ °С характеризується двома стадіями: 1) Повздовжній пластичний стиск (напрямок x за рис. 5 ж) рівня $\Delta\epsilon_{пл}^x \sim -1,0\%$ наряду із поперечним пластичним розтягом (напрями y та z за рис. 5 ж) рівнів $\Delta\epsilon_{пл}^y \sim +0,8\%$, $\Delta\epsilon_{пл}^z \sim +0,6\%$, що відбувається за $T > 400$ °С; 2) Повздовжній пластичний розтяг на рівні $\Delta\epsilon_{пл}^x \sim +0,6\%$ наряду із поперечним пластичним стиском до рівнів $\epsilon_{пл}^y \sim -0,3\%$, $\epsilon_{пл}^z \sim -0,3\%$, що відбувається за $T < 400$ °С. Об'ємність цього пластично-деформованого стану та змінність температури, за якої відбуваються ПД, не дозволяє кількісно оцінити залишковий запас пластичності металу цих зон, але наявне досягнення цими ділянками $\sigma_T \sim 1,3\sigma_T^{OM}$, наряду із несприятливою орієнтацією ПД відносно експлуатаційних навантажень та відсутністю структурного зміцнення, забезпечує максимальну їх схильність до руйнування.

- Повздовжні ЗН σ_{xx} (рис. 5 ж) і повздовжні відносні деформації завжди є превалюючими в ЗТВ з'єднань і відповідають першим головним напруженням (рис. 5 к), інші компоненти тензору напружень в пролітних КБ завжди $\leq 0,25\sigma_{xx}$ (рис. 5 з, и), тому їх впливом можна знехтувати.

- Попередній підігрів з'єднання, окрім зменшення ЗН та ПД, ініціює зміщення схильних до руйнування ділянок ЗТВ від геометричних концентраторів (лінії сплавлення) далі в бік основного металу.

Встановлено наступні закономірності розподілу НДС в ЗТВ поясних з'єднань КБ, виконаних двостороннім швом:

- Макродеформації (переміщення) з'єднання залежать лише від геометрії КБ, а не від положення валику (зовнішній/внутрішній), що накладається.

- Найбільший вплив на післязварний НДС має конструктивний фактор відношення товщин пояс/стінка $k = \delta_{п}/\delta_c$ (рис. 7 ж), а також такі технологічні

фактори як послідовність та затримка часу між накладанням валиків, що найбільш помітно за малих швидкостей зварювання ($v_{зв} \sim 2$ мм/с), при яких: накладання останнім внутрішнього валику поясного з'єднання знижує ЗН на 20...30%, ПД – в 2...2,3 рази; мінімізація затримки між накладанням валиків знижує ЗН – до 30%, ПД – до 2 разів.

Встановлено наступну закономірність розподілу НДС в ЗТВ *криволінійного з'єднання КБ змінної висоти*, виконаного одностороннім швом:

- Форма КБ змінної висоти викликає її унікальний деформаційний цикл, що, поряд із несиметричністю таврового з'єднання та жорсткістю контуру балки, формує ексцентриситет усадкових зусиль, високий градієнт ЗН за товщиною та підвищує вірогідність втрати стійкості. Максимальні градієнти спостерігаються в зоні радіусного переходу, де відношення $\sigma_{екв}$ внутрішньої/ зовнішньої поверхні сягає 1,6...2,2 (відповідно для $e = 0,2\delta_c \dots \delta_c$ (рис. 6 в)). Це робить неприпустимим усереднення напружень стінки за товщиною.

Встановлено наступні закономірності розподілу НДС в поясовому з'єднанні КБ *за наявності діафрагм або кронштейнів*:

- Картину залишкового НДС головним чином формує технологія накладання останнього з швів, яким виступає поясний шов або шов кронштейна, і яка найбільш потребує оптимізації.
- Наявність привареної діафрагми при накладанні поясного шву завжди викликає збільшення ЗН та ПД стінки, рівні яких сягають $1,7\sigma_T$ та 5% відповідно і значно залежать від зазору Н (рис 7 в).
- Приварювання кронштейнів до стінки КБ на відстані ≤ 40 мм від поясного шву знімає термічну історію поясного з'єднання та формує в ньому картину ЗН кінцевої ділянки довгого шву, що характеризується порівняно низькими повздовжніми поясу ЗН ($< 0,5\sigma_T$), але дуже високими ПД (до 8%).
- Мінімізація періоду затримки між накладанням розглянутих швів або попередній підігрів стінки в зонах розміщення діафрагм та кронштейнів до 1,7 разів знижує ЗН, до 2,5 разів знижує $\epsilon_{пл}^a$ небезпечної ділянки стінки та забезпечує відсутність крихких структур.

Об'єктивність результатів моделювання стану поясного з'єднання, виконаного одностороннім швом, перевірялася визначенням ЗН стінки КБ рами візка мостового крану ($Q = 50/16$ т); поясного з'єднання, виконаного двостороннім швом – визначенням структури та ЗН фрагменту з'єднання в лабораторних умовах; криволінійного з'єднання – за результатами експериментів проф. А.В. Вершинського.

Доведено, що жодними конструктивними та технологічними заходами, з поміж розглянутих, неможливо забезпечити зниження післязварних ЗН до рівня $\sigma_{екв} < (\sigma_T - 150 \text{ МПа})$, тому в нижніх поясних з'єднаннях КБ ВПМ при перших циклах експлуатаційного навантаження майже завжди будуть наявні ПД.

В четвертому розділі – “Рекомендації до оптимізації напруженого стану коробчастих балок мостових кранів на етапах проектування та виробництва” – розглянуто напруження та ПД верхніх і нижніх поясних з'єднання КБ при перших циклах експлуатаційного навантаження; отримано типові циклограми дійсного

НДС зон максимального стиску та розтягу нижнього і верхнього поясних з'єднань КБ; представлено рекомендації до конструктивних параметрів КБ ВПМ та технології їх виготовлення; оцінено ефективність конструктивних та технологічних рекомендацій за критерієм супротиву багатоцикловій втомі.

Встановлено, що релаксація рівня ЗН в ЗТВ нижніх поясних з'єднань навіть при експлуатаційному навантаженні $R_{\text{експл}}$, близькому до межі текучості основного металу ($\sigma_{\text{т}}^{\text{ОМ}}$), становить $< 65\%$, при $R_{\text{експл}} = 0,77\sigma_{\text{т}}^{\text{ОМ}}$ повздовжні ЗН зменшуються на $< 45\%$ (рис. 8), а за типового $R_{\text{експл}} = 0,5\sigma_{\text{т}}^{\text{ОМ}}$ релаксація сягає лише 25%. Тому нехтування ЗН станом під приводом їх релаксації при експлуатації бачиться неприпустимим.

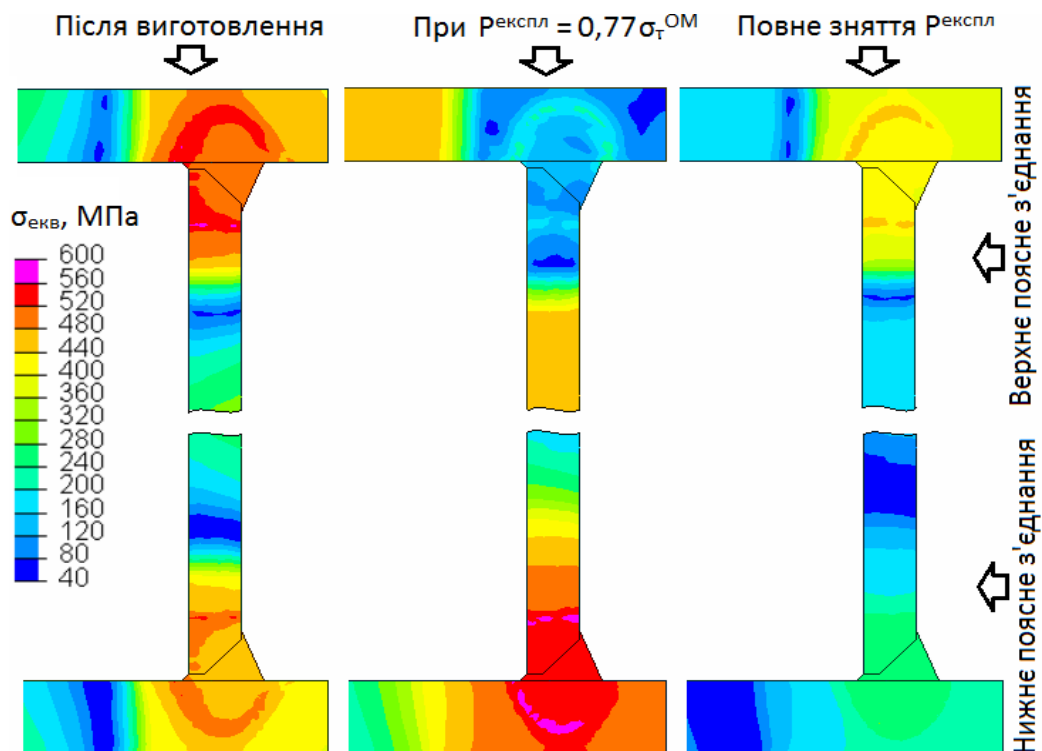


Рисунок 8 – Епюри еквівалентних напружень $\sigma_{\text{екв}}$ перерізу нижнього та верхнього поясного з'єднань коробчастої балки мостового крану в характерні моменти експлуатації

Показано, що кожна точка поясного зварного з'єднання працює за власною циклограмою напружень, спільною в них є амплітуда циклів, а різняться середні напруження циклу. Останні лінійно залежать від рівня зміщення $\sigma_{\text{т}}$ ділянки з'єднання, що остаточно формується лише після дії максимальних експлуатаційних навантажень. Доведено, що під час експлуатації прольотної КБ мостового крану, максимальні дійсні середні напруження циклу в ЗТВ поясних з'єднань спостерігаються на ділянках максимальних ЗН розтягу.

Виявлено, що зона ЗН стиску верхнього поясу КБ при значній амплітуді експлуатаційного циклу навантаження також зазнає ПД, це зпричиняє зниження ЗН зони розтягу верхнього поясного з'єднання (рис. 8, 9). Але в будь-якому випадку верхній поясний шов та його ЗТВ працюють за циклограмою з середніми напруженнями розтягу, в протифазі циклограми нижнього поясу.

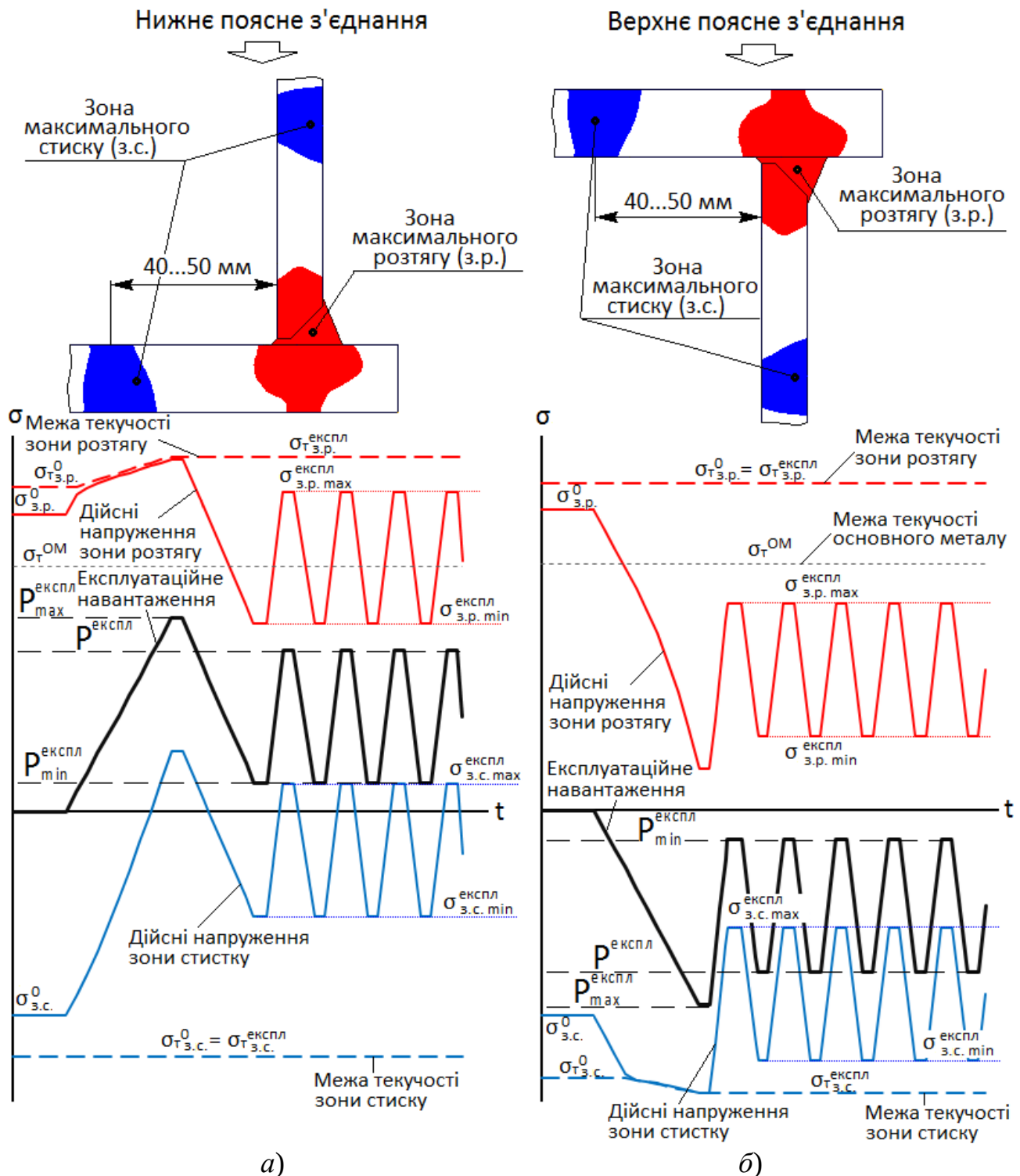


Рисунок 9 – Типові циклограми дійсних напружень нижнього (а) і верхнього (б) поясного з'єднання прольотної коробчастої балки мостового крану на початку експлуатації

Отримано характеристики дійсних циклів напружень зон максимального стиску та розтягу нижнього і верхнього поясних з'єднань КБ (рис. 9) з врахуванням перерозподілу післязварних ЗН при перших циклах експлуатації, які дозволяють проводити розрахунки КБ ВПМ за передовими методиками К.П. Манжули, В.М. Юшкевича, М.О. Кликова, де комплексно враховується вплив післязварного стану з'єднання на його витривалість.

Дотримуючись методу розрахунку межі витривалості елементів МК В.М. Юшкевича та рекомендацій М.Р. Нургужина, критерій оптимізації представлено в наступному вигляді:

$$\sigma_{RK} = \frac{2[\sigma_{-1}^{p.3.} - (1 - \beta^{p.3.})\sigma_{\max}^{\text{експл}}]}{(1 - R_{\sigma})\alpha\varphi_a + (1 + R_{\sigma})(1 - \beta^{p.3.})\alpha\varphi_m} \rightarrow \max \quad (1)$$

де: $\sigma_{\max}^{\text{експл}} = f(\sigma_{\text{екв}}, \sigma_T, \epsilon_{\text{пл}}^{\alpha}, R_{\max}^{\text{експл}})$ – максимальні експлуатаційні напруження розтягу поясного з'єднання КБ, що остаточно формуються після пластичних деформацій перших циклів експлуатації та залежать від рівня експлуатаційного навантаження і післязварного НДС, останній же визначається сполученням конструктивних та технологічних параметрів КБ ВПМ (рис. 7); $\sigma_{-1}^{p.3.}$ – межа витривалості зразків з металу розрахункової зони при $R_{\sigma} = -1$; $\beta^{p.3.} = 0,8$ – тангенс кута нахилу верхньої граничної лінії діаграми граничних напружень для металу розрахункової зони; $\alpha = 1,2$ – теоретичний коефіцієнт концентрації нормальних напружень при розтязі поясного з'єднання КБ; φ_a та $\varphi_m = \alpha^{-1}$ – коефіцієнти еквівалентності амплітудних і середніх напружень циклу при розтязі – стиску.

Для нижніх поясних з'єднань КБ, $\sigma_{\max}^{\text{експл}}$ завжди відповідає кінцевій (експлуатаційній) межі текучості ділянки максимальних ЗН ЗТВ $\sigma_{\max}^{\text{експл}} = \sigma_T^{\text{експл}}$; для верхніх поясних з'єднань $\sigma_{\max}^{\text{експл}}$ типово сягає $0,9...0,7\sigma_T^{\text{експл}}$, де $\sigma_T^{\text{експл}}$ фактично є післязварною межею текучості зони розтягу поясного з'єднання.

За методом рівномірного перебору проведено оптимізацію конструктивних і технологічних параметрів КБ в діапазоні їх значень, характерних для мостових кранів, за результатами якої запропоновано призначення *конструктивних параметрів* КБ мостових кранів (рис. 10), що дозволяють підвищити σ_{RK} до: 5 % – для односторонніх поясних з'єднань подалі від діафрагм; 11 % – для поясних з'єднань поблизу діафрагм або кронштейнів; 23 % – для поясних з'єднань виконаних двостороннім швом. Представлено рекомендації до *технології виготовлення* КБ мостових кранів, що дозволяють підвищити σ_{RK} на 13 % за рахунок синхронного підігріву або суміщення термічних циклів зварювання, і при яких гарантується мінімальне збільшення зерна ЗТВ. Вони полягають в наступному:

- 1) Односторонні поясні шви КБ ВПМ (рис. 10 в) накладати з $v_{зв} = 12...20$ мм/с та підігрівом до $T_0 \sim 200$ °С або випереджаючим супутнім підігрівом (рис. 11 а).
- 2) Першим валиком двостороннього шва КБ накладати зовнішній, виконувати його з високою швидкістю ($v_{зв} \sim 15...20$ мм/с), другий валик накладати повільніше ($v_{зв} \sim 6$ мм/с) із глибоким проплавленням в метал першого валику.
- 3) Максимально скоротити затримку t_3 між накладанням валиків двостороннього поясного шву, до $t_3 \sim 0,5$ хв. при $v_{зв} \geq 5$ мм/с, або $t_3 = 1...2$ хв. при $v_{зв} = 4...2$ мм/с відповідно.
- 4) Накладати верхні поясні шви КБ останніми (після нижніх).
- 5) Діафрагму в першу чергу приварювати до верхнього поясу, потім до стінок.
- 6) Криволінійний шов КБ змінної висоти виконувати першим, накладати від верхнього поясу до нижнього і з високою швидкістю.

7) При зазорах $H < 4,5\delta_c$ (рис. 10 а) виконувати місцевий супутній підігрів (рис. 11 а) ділянок приварювання діафрагм на відстань 100 мм в обидва боки від діафрагми.

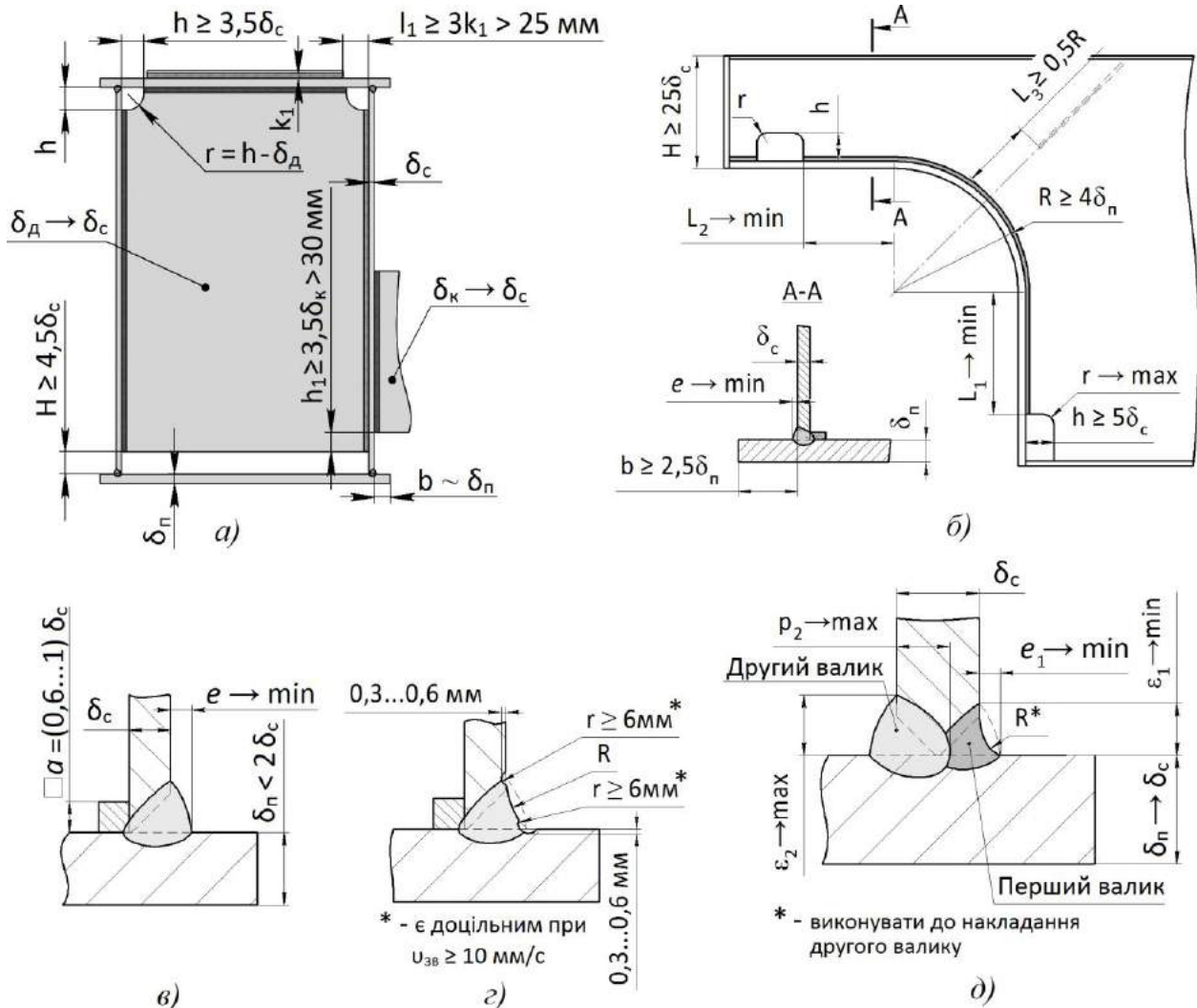


Рисунок 10 – Рекомендації до конструктивних параметрів коробчастих балок

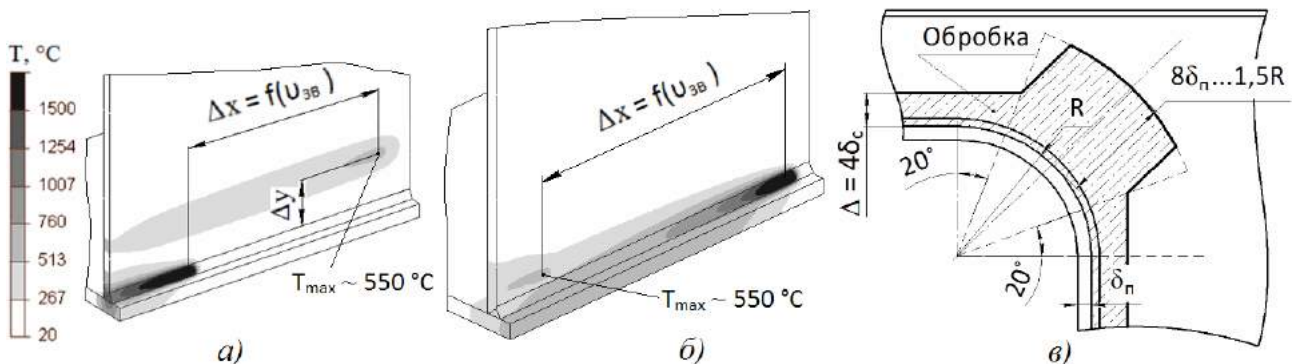


Рисунок 11 – Технологічні рекомендації по супутньому підігріву (а), післязварному прогріву (б), зонам механічної обробки (в) поясних з'єднань коробчастих балок

Представлено методику визначення оптимальних режимів супутнього підігріву (рис. 11 а) поясного з'єднання синхронним рухомим джерелом на

зразках-аналогах, що дозволяє до 2-х разів знизити ПД та ЗН з'єднання, не викликаючи перегріву. Представлено рекомендації по технології післязварної термічної обробки поясних з'єднань КБ (рис. 11 б), що дозволяє уникнути утворення мартенситу та на 20-30% знизити рівень ПД.

В додатках дисертаційного дослідження:

- Представлено аналіз обмежень по використанню експериментальної методики ASTM E837-08.
- Представлено рекомендації до визначення післязварного напружено-деформованого стану зварних з'єднань методом свердлення глухого отвору.
- Представлено рекомендації до моделювання технологічного стану зварних з'єднань металевих конструкцій вантажопідйомних кранів.

ВИСНОВКИ

Проведені в роботі дослідження дозволили вирішити актуальну науково-прикладну задачу підвищення межі витривалості та пластичності поясних зварних з'єднань коробчастих балок мостових кранів за рахунок оптимізації їх післязварного стану конструктивними та технологічними способами.

1. На підставі кінцево-елементних моделювань і експериментально вперше проведено дослідження післязварного стану поясних зварних з'єднань кранових коробчастих балок із деталізацією зони термічного впливу, що дозволило побудувати теоретичну модель цього стану, згідно якої:

- величина максимальних залишкових напружень залежить від режимів нагрівання та охолодження, а також від параметрів геометрії поясного з'єднання, а не від габаритів балки;
- розрахунковою необхідно вважати ділянку максимальних залишкових напружень, що відповідає точкам з'єднання в яких максимальна температура сягала 867 °С;
- ділянки поясного з'єднання що зазнали повного циклу фазових перетворень при усадці не досягають межі текучості, тобто мають невичерпаний запас пластичності.

2. Серед розглянутих конструктивних і технологічних параметрів коробчастих балок найбільший вплив на залишковий стан поясних з'єднань, виконаних одностороннім швом, має технологія попереднього підігріву з'єднання, за рахунок якої можна до 45% знизити пластичні деформації, до 30% знизити залишкові напруження, до 100% знизити концентрацію мартенситу.

3. Найбільший вплив на залишковий стан поясних з'єднань, виконаних двостороннім швом мають:

- конструктивний параметр відношення товщин поясу та стінки, мінімізація якого дозволяє знизити ЗН до 1,5 раз, ПД до 3,5 раз;
- період затримки між накладанням валиків, регулюванням якого можна знизити ЗН на 30%, ПД – в 2,2 раз;
- порядок накладання валиків, де виготовлення внутрішнього валика останнім знижує ЗН на 25 %, ПД – до 2 раз.

4. Наявність шву діафрагми при накладанні поясного шву може викликати 35% збільшення ЗН та 3-х кратне збільшення ПД стінки. Мінімізація періоду затримки між накладанням шву діафрагми та поясу або попередній підігрів стінки в зонах розміщення діафрагм до 1,7 разів знижує ЗН, до 2,5 разів знижує ПД та забезпечує відсутність крихких структур.

5. В стінці коробчастої балки змінної висоти на ділянці радіусного переходу з'являються додаткові дотичні ЗН, що сягають 300 МПа і компенсуються дотичними напруженнями протилежного знаку в нижньому поясі та/або безпосередньо в з'єднанні.

6. Отримано типові циклограми дійсних напружень поясних з'єднань пролітних коробчастих балок мостових кранів з урахуванням пластичного деформування перших циклів навантаження. Встановлено що:

- При перших циклах експлуатації пролітної балки більшість точок зони ЗН розтягу нижнього поясного з'єднання зазнають ПД на рівні 0,2...0,4%.
- Типові рівні навантаження пролітних коробчастих балок кранів мостового типу не є достатніми для значної релаксації післязварних ЗН, яка фактично досягає лише 15...35%.
- В пролітних коробчастих балках кранів мостового типу реальні коефіцієнти асиметрії циклу зони розтягу нижнього поясного з'єднання складають 0,7...0,85, верхнього – 0,6...0,75.

7. Запропоновано комплекс рекомендацій до конструкції і технології виготовлення коробчастих балок мостових кранів, а також дозварної підготовки та післязварної обробки їх поясних з'єднань, що дозволяють раціоналізувати технологічний та експлуатаційний стан цих вузлів, за рахунок чого забезпечується підвищення межі витривалості поясних з'єднань до 1,23 раз.

8. Створено експериментальну установку для вимірювання дійсних напружень методом свердління глухого отвору, що дозволяє визначати їх величину та орієнтацію в шарі металу товщиною від 25 мкм.

9. За рахунок вдосконалення технології проведення експерименту і алгоритму обробки його результатів, вдалося до 20 % підвищити точність визначення ЗН в зонах термічного впливу зварних з'єднань.

Впровадження результатів роботи в конструкторську практику і у виробництво забезпечило: раціоналізацію післязварного стану поясних з'єднань коробчастих балок кранів мостового типу за опором багатоцикловій втомі та крихкому руйнуванню; підвищення їх якості та загального технічного рівня.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні праці:

1. Лятуринський В.О. Аналіз напруженого стану мостових кранів / В.О. Лятуринський, О.М. Руднєв // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. – 2012 – № 133. – С. 246-248.
2. Сидоренко М.В. Обґрунтування методики аналізу залишкових напружень в кранових металоконструкціях та деталях на основі когерентної оптики /

М.В. Сидоренко, В.О. Лятуринський // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. – 2013 – № 137. – С. 208-213.

3. Лятуринський В.О. Дослідження залишкових напружень зварних з'єднань методом свердлення глухого отвору / В.О. Лятуринський, М.В. Сидоренко // Будівництво, матеріалознавство, машинобудування. – Дніпропетровськ, 2015. – №80. – С. 363-369.

4. Лятуринский В.А. Моделирование послесварочного напряженно-деформированного состояния коробчатых крановых балок с криволинейными швами / В.А. Лятуринский, М.В. Сидоренко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2013 – №2. – С. 130-138.

5. Лятуринский В.А. Остаточные напряжения в тавровых сварных соединениях крановых коробчатых балок / В.А. Лятуринский, М.В. Сидоренко // Подъёмно-транспортная техника. – 2015 – №2 (46). – С. 23-36.

6. Лятуринский В.А. Технологическое напряженное состояние коробчатой крановой балки с учётом наложения нескольких сварных швов / В.А. Лятуринский, М.В. Сидоренко // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. – 2014 – № 148. – С. 154-160.

7. Лятуринський В.О. Конструктивна та технологічна оптимізація коробчастих балок кранів мостового типу / В.О. Лятуринський, М.В. Сидоренко // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. – № 5/1 (25). – С. 20-25. doi:10.15587/2312-8372.2015.51821.

[Індексується в міжнародних наукометричних базах та системах: Ulrich's Periodicals Director, DRIVER, BASE, Index Copernicus, РИНЦ, ResearchBib, DOAJ, WorldCat, EBSCO, Directory Indexing of International Research Journals, DRJI, OAJI, Sherpa/Romeo, Open Access Articles].

Опубліковані праці апробаційного характеру:

8. Руднєв О.М. Аналіз напруженого стану мостового крану / О.М. Руднєв, В.О. Лятуринський // Науково-практична конференція «Тиждень науки», – Запоріжжя, 2012. – С. 43.

9. Лятуринський В.О. Вдосконалення способів виміру залишкових напружень в металоконструкціях та деталях кранів / В.О. Лятуринський // Науково-практична конференція «Тиждень науки», – Запоріжжя, 2013. – С. 29-30.

10. Лятуринский В.А. Технологические напряжения в сварных соединениях крановых металлоконструкций / В.А. Лятуринский // Науково-практична конференція «Тиждень науки», – Запоріжжя, 2014. С. 120-123.

11. Лятуринский В.А. Анализ напряженно-деформированного состояния сварных крановых балок при их изготовлении / В.А. Лятуринский, С.С. Горбачев // Науково-практична конференція «Тиждень науки», – Запоріжжя, 2014. С. 125-127.

12. Лятуринський В.О. Дослідження залишкових напружень зварних з'єднань методом свердлення глухого отвору / В.О. Лятуринський, М.В. Сидоренко // XXV Міжнародна науково-технічна конференція «Стародубівські читання», – Дніпропетровськ, 2015.

13. Лятуринський В.О. Оптимізація залишкового напруженого стану металевих конструкцій вантажопідйомних кранів при їх виготовленні / В.О. Лятуринський,

М.В. Сидоренко // 12-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові, – Львів, 2015. С. 179-180.

14. Лятуринський В.О. Експериментальне визначення залишкових напружень методом свердлення глухого отвору / В.О. Лятуринський, М.В. Сидоренко // Науково-практична конференція «Тиждень науки», – Запоріжжя, 2015. С. 252-254.

15. Лятуринский В.А. Проектирование и изготовление коробчатых балок мостовых кранов с учетом сварочных остаточных напряжений / В.А. Лятуринский, М.В. Сидоренко // Науково-практична конференція «Тиждень науки», – Запоріжжя, 2016. С. 203-204.

16. Лятуринский В.А. Приборное и методическое обеспечение измерения остаточных напряжений в областях высокоградиентных полей / В.А. Лятуринский, М.В. Сидоренко, Д.В. Павленко // 9-я Международная научно-техническая конференция, «Приборостроение – 2016», – Минск, 2016. С. 90-91.

АНОТАЦІЯ

Лятуринський В. О. Формування оптимального технологічного напружено-деформованого стану поясних зварних з'єднань коробчастих балок мостових кранів конструктивними і технологічними способами. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.05 – піднімально-транспортні машини. – Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2017.

За рахунок кінцево-елементних моделювань та експериментально досліджено технологічний стан поясних зварних з'єднань коробчастих балок мостових кранів з урахуванням фазових та структурних перетворень зон термічного впливу. Побудовано теоретичну модель цього стану.

Представлено залежності та закономірності впливу конструктивних та технологічних параметрів коробчастих балок на розподіл напружень, деформацій та структур в зоні термічного впливу поясних з'єднань. Створено рекомендації до оптимізації післязварного стану поясних з'єднань коробчастих балок за критерієм межі витривалості, шляхом формування сприятливого сполучення їх конструктивних та технологічних параметрів.

Вдосконалено методику експериментального визначення залишкових напружень в зварних з'єднаннях.

Ключові слова: коробчата балка, мостовий кран, зварювання, залишкові напруження, пластичні деформації, зона термічного впливу.

SUMMARY

Liaturynskiy V. A. Creation of an optimal technological stress-strain state of lap welds of box beams of overhead cranes by the design and technological means. – The manuscript.

Thesis for a candidate degree in specialty 05.05.05 – Hoisting machinery. –

Odessa National Polytechnic University, Odessa, 2017.

Due to the finite-element simulations and experimentally the stress-strain state of the box beams' lap welds considering phase and structural transformations of the heat-affected zones was investigated. The theoretical model of this state was created.

The dependencies and regularities of structural and technological parameters of box beams on the distribution of stresses, strains and structures in the heat-affected zone of lap joints were investigated. The recommendations devoted to the optimization of the post-weld stress-strain state of lap joints of box beams on the criterion of endurance limit by a favorable combination of structural and technological parameters are presented.

The method of an experimental determination of residual stresses in welded joints was improved.

Keywords: box beam, overhead crane, welding, residual stresses, plastic deformation, heat-affected zone.

АННОТАЦИЯ

Лятуринский В. А. Формирование оптимального технологического напряженно-деформированного состояния поясных сварных соединений коробчатых балок мостовых кранов конструктивными и технологическими способами. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.05 – подъемно-транспортные машины. – Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2017.

Диссертация посвящена исследованию послесварочного напряженно-деформированного состояния поясных соединений коробчатых балок мостовых кранов и выделению путей его оптимизации конструктивными и технологическими способами.

Освещена проблематика технологического состояния сварных соединений и их влияния на долговечность металлических конструкций грузоподъемных кранов.

Обоснованы методики трехмерного конечно-элементного моделирования процессов сварки, а также экспериментально определения остаточных напряжений методом сверления глухих отверстий, в контексте анализа зон термического влияния тавровых сварных соединений из низколегированной стали.

За счет конечно-элементных моделирований и экспериментально, исследовано напряженно-деформированное состояние поясных сварных соединений коробчатых балок из низколегированной стали с учетом фазовых и структурных превращений зон термического влияния. Представлена модель технологического напряженно-деформированного состояния поясных соединений коробчатых крановых балок. Указанная теоретическая модель позволила локализовать участки неблагоприятного сочетания технологических напряжений, пластических деформаций и хрупких структур в зоне термического влияния поясных соединений, выполненных односторонними, двусторонними и

криволинейными швами и дала возможность обосновать набор значимых параметров технологического состояния соединений для осуществления их оптимизации.

Получены зависимости и закономерности влияния конструктивных и технологических параметров коробчатых балок мостовых кранов на распределение напряжений, деформаций и структур в зоне термического влияния поясных соединений, а именно: скорости наложения сварных швов, порядка наложения валиков, задержки времени между наложением швов, геометрии диафрагм и кронштейнов, обработки швов, технологии подогрева, послесварной обработки. Полученные зависимости и закономерности позволяют учитывать последствия сварки при конструировании и изготовлении коробчатых крановых балок.

Получены характерные циклограммы действительных напряжений верхних и нижних поясных соединений пролетных коробчатых балок мостовых кранов, с учетом пластического деформирования при первых циклах эксплуатации, уточняющие характер их упруго-пластического поведения и позволяющие использовать более объективные методики расчета металлоконструкций мостовых кранов на выносливость, учитывающие остаточные напряжения и деформации сварных соединений.

Созданы рекомендации по оптимизации технологического состояния поясных соединений коробчатых балок по критерию предела выносливости, путем формирования благоприятного сочетания их конструктивных и технологических параметров, а также технологий досварной подготовки и послесварной обработки, которые позволяют до 23% повысить предел выносливости этих узлов.

Усовершенствована методика экспериментального определения остаточных напряжений в сварных соединениях, выполненных угловыми швами методом сверления глухого отверстия, за счет чего удалось до 20% повысить точность результатов эксперимента.

Получила развитие методика трехмерного конечно-элементного моделирования технологического напряженно-деформированного состояния и распределения структур сварных соединений, которая позволяет детализировать процессы зоны термического влияния низколегированной стали. Созданы рекомендации к моделированию остаточного напряженно-деформированного состояния в крановых металлических конструкциях из низколегированных сталей.

За счет рационального сочетания измерения параметров шва, структурных исследований и метода сверления глухого отверстия, обеспечена достоверность результатов определения остаточных напряжений в поясных соединениях коробчатых балок грузоподъемных кранов.

Ключевые слова: коробчатая балка, мостовой кран, сварка, остаточные напряжения, пластические деформации, зона термического влияния.

Підписано до друку 24.03.2017 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.

Друк ризографний. Друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 283.

Видавець та виготовлювач

69063, м. Запоріжжя, ЗНТУ, друкарня, вул. Жуковського, 64.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2394 від 27.12.2005 р.