

УДК 621.874: 539.3

- Михайло Сидоренко канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри деталей машин і підйомно-транспортних механізмів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: sidorenko.mik@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9097-9739
- Василь Лятуринський канд. техн. наук, головний інженер, ТОВ «Завод підйомних машин», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: vasilyliat@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7487-0696
- Роман Фролов канд. техн. наук, ст. викладач кафедри деталей машин і підйомно-транспортних механізмів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, ORCID: 0009-0001-8769-8848

ОПТИМІЗАЦІЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОЯСНИХ З'ЄДНАНЬ КОРОБЧАСТИХ БАЛОК МОСТОВИХ КРАНІВ

Мета роботи. Підвищити границю 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.

Методи дослідження. 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.

Отримані результати. Розроблено теоретичну модель напружено-деформованого стану поясних з'єднань коробчастих кранових балок з урахуванням фазових і структурних перетворень зон термічного впливу. Отримано емпіричні залежності впливу технологічних параметрів виготовлення та конструктивних параметрів балок на післязварний стан їх поясних з'єднань. Встановлено закономірності перерозподілу залишкових напружень та пластичних деформацій на перших циклах навантаження. Запропоновано критерій оптимізації післязварного стану – кінцеву границю текучості ділянки максимальних залишкових напружень після максимального експлуатаційного навантаження. Розроблено науково-обґрунтовані конструктивні та технологічні рекомендації, що дозволяють до 1,23 раз підвищити границю витривалості поясних з'єднань коробчастих балок мостових кранів.

Наукова новизна. Запропоновано теоретичну модель післязварного напружено-деформованого стану поясних з'єднань, що враховує фазові і структурні перетворення зон термічного впливу. Отримано емпіричні залежності та закономірності впливу параметрів технології виготовлення та конструкції на післязварний стан. Встановлено закономірності перерозподілу залишкових напружень та пластичних деформацій при перших циклах навантаження кранів.

Практична цінність. Розроблено конструктивні та технологічні рекомендації для підвищення границі витривалості поясних з'єднань коробчастих балок. Отримано характеристики дійсних циклів напружень, що враховують рівень залишкових напружень та пластичні деформації перших циклів експлуатації. Розроблено рекомендації до визначення напружень та моделювання післязварного стану металевих конструкцій.

Ключові слова: коробчаста балка, мостовий кран, зварювання, залишкові напруження, пластичні деформації, зона термічного впливу, границя витривалості, післязварний стан, тріщиностійкість.

Вступ

Сучасний стан галузі кранобудування в Україні характеризується необхідністю підвищення конкурентоспроможності вітчизняної продукції шляхом покращення якості та технологічності металоконструкцій вантажопідйомних кранів. Металеві конструкції становлять значну частку в загальній вартості крана та визначають його ключові експлуатаційні характеристики – надійність і довговічність.

Дослідження показують, що руйнування металоконструкцій вантажопідйомних кранів найчастіше відбувається в зонах високих залишкових напружень зварних з'єднань. Особливо це стосується мостових кранів із коробчастими балками, які набули широкого застосування на підприємствах машинобудування, металургії та енергетики.

Перспективним шляхом підвищення надійності та довговічності коробчастих балок є впровадження методів регулювання залишкового напружено-дефор-

мованого стану зварних з'єднань ще на етапах проектування та виготовлення. Проте реалізація цього підходу ускладнюється недостатнім рівнем вивчення післязварного стану таких конструкцій. З іншого боку, сучасні методики визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях дозволяють проводити як кількісні експериментальні дослідження, так і достатньо точні розрахунки чисельними методами.

Комплексне дослідження післязварного напружено-деформованого стану коробчастих кранових балок з урахуванням їх технологічних і конструктивних особливостей дозволяє виявити закономірності формування полів напружень та деформацій, а також розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо їх оптимізації. Це має безпосередній вплив на підвищення границі витривалості, запасу пластичності та загального технічного рівня коробчастих балок вантажопідйомних кранів.

Дослідження післязварного стану поясних з'єднань потребує застосування комплексного підходу, що поєднує експериментальні методи визначення залишкових напружень, чисельне моделювання зварювальних процесів із урахуванням фазових і структурних перетворень, а також аналіз впливу перших циклів експлуатаційного навантаження на перерозподіл напружень і деформацій. Такий підхід створює основу для розробки ефективних технологічних і конструктивних заходів, спрямованих на оптимізацію післязварного стану та, як наслідок, підвищення надійності та довговічності коробчастих балок мостових кранів.

Аналіз досліджень та публікацій

Питанню дослідження впливу наслідків зварювання на технологічність, статичну міцність і довговічність металевих конструкцій присвячено значну кількість наукових робіт. Особливу увагу дослідників привертають металокопії вантажопідйомних машин. Більшість досліджень підтверджують, що структурні зміни в металі, вичерпання пластичності та наявність високих залишкових напружень розтягу негативно впливають на якість і довговічність металокопії вантажопідйомних машин. Так, у роботі Fricke та співавторів [1] досліджено вплив різних типів зварних з'єднань на втомну міцність металокопії, що працюють в умовах змінних навантажень. Автори підкреслюють, що залишковий напружено-деформований стан є критичним фактором при оцінці довговічності зварних конструкцій.

Варто відзначити, що сучасні методи розрахунку металокопії вантажопідйомних машин переважно базуються на припущенні про відсутність технологічних напружень і деформацій. Однак такий підхід не дозволяє об'єктивно оцінити реальний стан конструкції. Zerbst та інші [2] у своєму огляді наголошують на необхідності врахування залишкових напружень при оцінці цілісності зварних конструкцій та пропонують інтегрований підхід до моделювання механізмів руйнування.

У дослідженні Barsoum і Gustafsson [3] представлено комплексну методику прогнозування втомної міцності зварних з'єднань з урахуванням геометричних параметрів та залишкових напружень, що має особливе значення для розуміння поведінки поясних з'єднань коробчастих балок.

Важливий внесок у розуміння впливу післязварного стану на властивості з'єднань зробили Zhu та Chao [4], які розробили тривимірну кінцево-елементну модель для аналізу температурних полів, залишкових напружень та деформацій у зварних з'єднаннях. Їхні результати підтверджують необхідність врахування змін механічних властивостей матеріалу в зоні термічного впливу.

Комплексний аналіз залишкових напружень у зварних конструкціях великих розмірів представлено в роботі Deng та співавторів [5]. Вони показали, що розподіл залишкових напружень суттєво залежить від послідовності накладання зварних швів та геометрії конструкції, що особливо актуально для коробчастих балок мостових кранів.

Дослідження Balasubramanian і Guha [6] з оптимізації параметрів зварювання для зниження залишкових напружень демонструє важливість технологічних факторів у формуванні післязварного стану конструкцій. Аналогічні висновки представлені в роботі Paradowska та інших [7], де експериментально досліджено вплив послідовності зварювання на розподіл залишкових напружень у конструкційних сталях.

Сприятливий післязварний стан зварного з'єднання передбачає мінімізацію рівня залишкових напружень, розміру зерна, концентрації крихких структур і рівня пластичних деформацій. Gannon та інші [8] експериментально підтвердили зв'язок між мікроструктурою зони термічного впливу та механічними властивостями зварних з'єднань низьколегованих сталей.

Таким чином, незважаючи на значну кількість досліджень [9–15] галузі зварних металокопії, проблема оптимізації післязварного напружено-деформованого стану поясних з'єднань коробчастих балок мостових кранів залишається актуальною та потребує комплексного підходу, який враховував би взаємозв'язок між технологічними, конструктивними та експлуатаційними факторами.

Мета роботи

Мета дослідження полягає у підвищенні границі витривалості та пластичності поясних з'єднань коробчастих балок мостових кранів шляхом оптимізації їх післязварного напружено-деформованого стану через раціональне поєднання конструктивних та технологічних параметрів. Завданнями дослідження є розробка теоретичної моделі післязварного напружено-деформованого стану з'єднань з урахуванням фазових і структурних перетворень зон термічного впливу, встановлення емпіричних залежностей впливу технологічних і конструктивних параметрів на післязварний стан, дослідження закономірностей перерозподілу залишкових

напружень та пластичних деформацій при перших циклах навантаження, формулювання критерію оптимізації післязварного стану та розробка науково обґрунтованих конструктивних і технологічних рекомендацій для підвищення границі витривалості поясних з'єднань коробчастих балок мостових кранів.

Об'єктом дослідження є післязварний стан поясних з'єднань коробчастих балок мостових кранів, тоді як предметом дослідження виступають закономірності впливу конструктивних та технологічних параметрів кранових коробчастих балок на формування полів залишкових напружень, деформацій та структур у зонах термічного впливу цих з'єднань. Особлива увага приділяється встановленню взаємозв'язків між режимами зварювання, геометричними характеристиками балок та параметрами післязварного стану, а також впливу перших циклів експлуатаційного навантаження на перерозподіл залишкових напружень і пластичних деформацій, що дозволяє розробити науково обґрунтовані принципи оптимізації післязварного напружено-деформованого стану для підвищення границі витривалості та запасу пластичності поясних з'єднань.

Матеріал і методика досліджень

Для комплексного дослідження післязварного напружено-деформованого стану поясних з'єднань коробчастих балок мостових кранів застосовано поєднання експериментальних та розрахункових методів, що дозволило забезпечити достовірність отриманих результатів та їх практичну цінність.

Деталізація напружено-деформованого стану в зонах термічного впливу зварних з'єднань забезпечувалась двоетапним моделюванням методом кінцевих елементів. На першому етапі проводився термічний розрахунок з формуванням баз даних розподілу температур, концентрацій фаз і структурних складових, а також залежних від них фізичних і механічних властивостей матеріалу. На другому етапі виконувався розрахунок напружено-деформованого стану для кожного кроку моделювання.

Особливостями запропонованої методики моделювання, що забезпечили об'єктивність результатів, є використання тривимірної двоеліпсоїдної моделі енерговкладання, урахування температурозалежних фізичних і механічних властивостей металу, концентрацій фаз та структурних складових на основі діаграм неізо-термічного перетворення переохолодженого аустеніту, а також врахування енергетики та механіки фазових і структурних перетворень.

Для експериментального визначення залишкових напружень в зонах термічного впливу зварних з'єднань розроблено спеціальну установку, що дозволяє проводити багатокрокове високошвидкісне (частота турбіни до 350 000 об/хв) свердлення отворів діаметром до 2,5 мм з тензометруванням деформаційного відгуку кромки отвору на кожному кроці. Управління установкою та обробка результатів здійснювались за допомогою АЦП/ЦАП на персональному комп'ютері.

Для підвищення точності експериментальних досліджень відокремлено та проаналізовано основні джерела похибок при визначенні залишкових напружень в зонах термічного впливу кутових зварних з'єднань, зокрема: високі градієнти залишкових напружень, близькість їх величин до границі текучості металу, близькість розташування валиків зварних швів, а також кінцева ширина тензорезистора розетки. Розроблено рекомендації щодо мінімізації зазначених похибок, що дозволило на 5...20 % підвищити точність результатів.

Для використання стандартизованого методу визначення залишкових напружень ASTM E 837-08 із тензорозетками нестандартних розмірів запропоновано внесення коригуючого коефіцієнта до фізичного радіусу тензорозетки, що дозволило розширити коло використовуваних тензорозеток для методу свердлення глухого отвору.

Верифікація результатів моделювання післязварного стану зварного з'єднання проводилась шляхом порівняння: історії термічного циклу контрольної точки зони термічного впливу з використанням пірометра; геометрії зварної ванни моделі та макрощліфу з'єднання; розрахункових та експериментальних деформацій з'єднання; розподілу залишкових напружень в з'єднанні. Розбіжності між експериментальними та розрахунковими даними не перевищували 60 МПа, що з урахуванням складності досліджуваних процесів та високих градієнтів напружень є прийнятним результатом.

Для дослідження впливу конструктивних і технологічних параметрів коробчастих балок на післязварний напружено-деформований стан їх поясних з'єднань застосовано метод математичного планування експериментів. Для статистичного опрацювання результатів використовувались стандартні методики, а для візуалізації отриманих даних – спеціалізоване програмне забезпечення.

Металографічні дослідження структури зони термічного впливу зварних з'єднань проводились на оптичному мікроскопі з цифровою фіксацією результатів, що дозволило встановити зв'язок між параметрами термічного циклу зварювання та структурними перетвореннями в металі.

Результати досліджень

На основі чисельного моделювання та експериментальних досліджень розроблено теоретичну модель післязварного стану поясних з'єднань коробчастих кранових балок з одностороннім швом. Результати аналізу даних розрахунку 127 моделей, що охоплюють весь інтервал варіювання конструктивних параметрів коробчастих балок, дозволили встановити, що положення екстремумів залишкових напружень та пластичних деформацій в зоні термічного впливу залежить головним чином від максимальної температури $T_{\max}$, досягнутої при зварюванні. Максимальне структурне зміцнення (гартування) спостерігається в точках найменшої тривалості фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення, які ві-

дповідують $T_{\max} \approx 1100$ °C. Максимальний рівень залишкових напружень наявний в точках найменшої тривалості існування аустеніту, що відповідають $T_{\max} \approx 867$ °C. Максимальний рівень пластичних деформацій зафіксовано в найближчих до шву точках, що не зазнавали фазових перетворень, з $T_{\max} \approx 727$ °C.

Дослідження показують, що довговічність зварного з'єднання головним чином лімітується зонами максимальних залишкових напружень, тому при розрахунках поясних з'єднань коробчастих балок на витривалість необхідно розглядати точки зони термічного впливу, що досягали $T_{\max} \approx 867$ °C. Рівень технологічного вичерпання пластичності поясного з'єднання доцільно оцінювати за пластичними деформаціями ділянки з $T_{\max} \approx 727$ °C, які характеризуються високотемпературним пластичним стиском з наступним низькотемпературним пластичним розтягом (рис. 1).

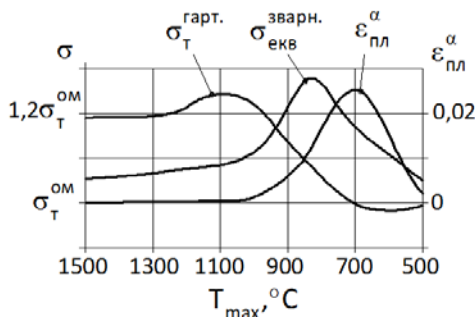


Рисунок 1. Принципові графіки залежностей рівня еквівалентних післязварних напружень, зміцнення гартуванням та пластичних деформацій від максимальної температури $T_{\max}$ ділянки зони термічного впливу поясного зварного з'єднання коробчастої балки з низьколегованої сталі

Встановлено, що величини максимальних залишкових напружень та пластичних деформацій в зоні термічного впливу залежать від режимів нагріву та охолодження і від параметрів геометрії поясного з'єднання, а не від габаритів коробчастої балки (рис. 2). Для доведення цього положення було проаналізовано напружено-деформований стан зони термічного впливу поясних з'єднань коробчастих балок чотирьох різних габаритів. Результати показали, що на моделях з розмірами понад 300×300 мм об'єктивний післязварний стан поясного з'єднання вже не зазнає додаткових змін.

Аналіз результатів моделювання свідчить, що розподіл структур, залишкових напружень та пластичних деформацій в поясі коробчастої балки має радіальний характер з крутим градієнтом, що обумовлено значною товщиною поясу відносно розміру валику поясного шва. Високі градієнти напружень та деформацій за товщиною демонструють необ'єктивність усереднення напружено-деформованого стану поясу в двовимірних скінечно-елементних моделях та доводять необхідність тривимірного моделювання із розбиттям поясу по товщині щонайменше на три кінцеві елементи.

Для поясного з'єднання, виконаного двостороннім швом, встановлено, що вирішальний вплив на піс-

лязварний напружено-деформований стан має термічний цикл від накладання другого валику. При цьому радіальність зони термічного впливу останнього валику поширюється на перший валик і спричиняє високі залишкові напруження та пластичні деформації в зонах геометричної концентрації першого валику. При накладанні останнього з валиків з'єднання зварна ванна та ділянка $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ перетворень зони термічного впливу знаходиться в жорсткому, попередньо зміцненому «холодному» контурі, сформованому поясом, стінкою та першим валиком, що при наступному охолодженні ініціює підвищення рівня та градієнтів пластичних деформацій і залишкових напружень в з'єднанні. За несприятливих умов рівень залишкових напружень першого валику та зон концентраторів може досягати $1,6\sigma_T$, наближаючись до границі міцності матеріалу.

В коробчастій балці змінної висоти на ділянці радіусного переходу з'являються додаткові дотичні залишкові напруження, які компенсуються значними дотичними напруженнями протилежного знаку в нижньому поясі та/або безпосередньо в з'єднанні, залежно від радіусу переходу. Зміна напрямку траєкторії валику спричиняє двонаправленість усадкового навантаження стінки навпроти радіусного переходу, що в поєднанні з високою товщиною поясу та жорсткістю контуру коробчастої балки змінної висоти призводить до виникнення значних дотичних напружень рівня $\tau = 150 \dots 300$ МПа (відповідно для $R = 10\delta_{\text{п}} \dots 2\delta_{\text{п}}$). Перший максимум цих напружень спостерігається на відстані $0,4(R+h_{\text{в}})$ від поясу, а другий, компенсуючий, максимум протилежного знаку розташований безпосередньо в зоні з'єднання. Внаслідок цього рівень пластичних деформацій та еквівалентних напружень є вищим, ніж на прямолінійних ділянках, і має оцінюватися не тільки в зоні термічного впливу з'єднання, а й в стінці балки вздовж бісектриси кута переходу.

Досліджено вплив на післязварний напружено-деформований стан коробчастих балок мостових кранів конструктивних параметрів (рис. 2) та технологічних факторів: швидкості зварювання $v_{\text{зв}}$, температури дозварного підігріву T_0 , режиму післязварного підігріву, кількості наплавленого металу. Проведено ранжування рівнів значимості факторів оптимізації за рівня значущості $\alpha = 0,05$, для найбільш вагомих з них отримано емпіричні залежності параметрів напружено-деформованого стану зони термічного впливу поясних з'єднань коробчастих балок від їх значень (рис. 3).

Встановлено, що для поясного з'єднання коробчастої балки, виконаного одностороннім швом, товщина поясу $\delta_{\text{п}}$, товщина стінки $\delta_{\text{с}}$ та швидкість зварювання в діапазоні $v_{\text{зв}} = 5 \dots 12$ мм/с мало впливають на напружено-деформований стан (рис. 2а, б). Це дозволяє поширити представлену модель післязварного стану та встановлені закономірності на будь-які типові коробчасті балки мостових кранів.

Для поясних з'єднань коробчастих балок, виконаних одностороннім швом, виявлено, що зварні валики

характеризуються на 20...35 % підвищеною за основний метал границею текучості σ_T , нижчим, ніж в зоні термічного впливу, рівнем залишкових напружень, відсутністю пластичних деформацій після фазового

перетворення та меншою концентрацією мартенситної структури, що з позиції залишкового стану дозволяє вважати їх менш схильними до руйнування, ніж зону термічного впливу поясних з'єднань.

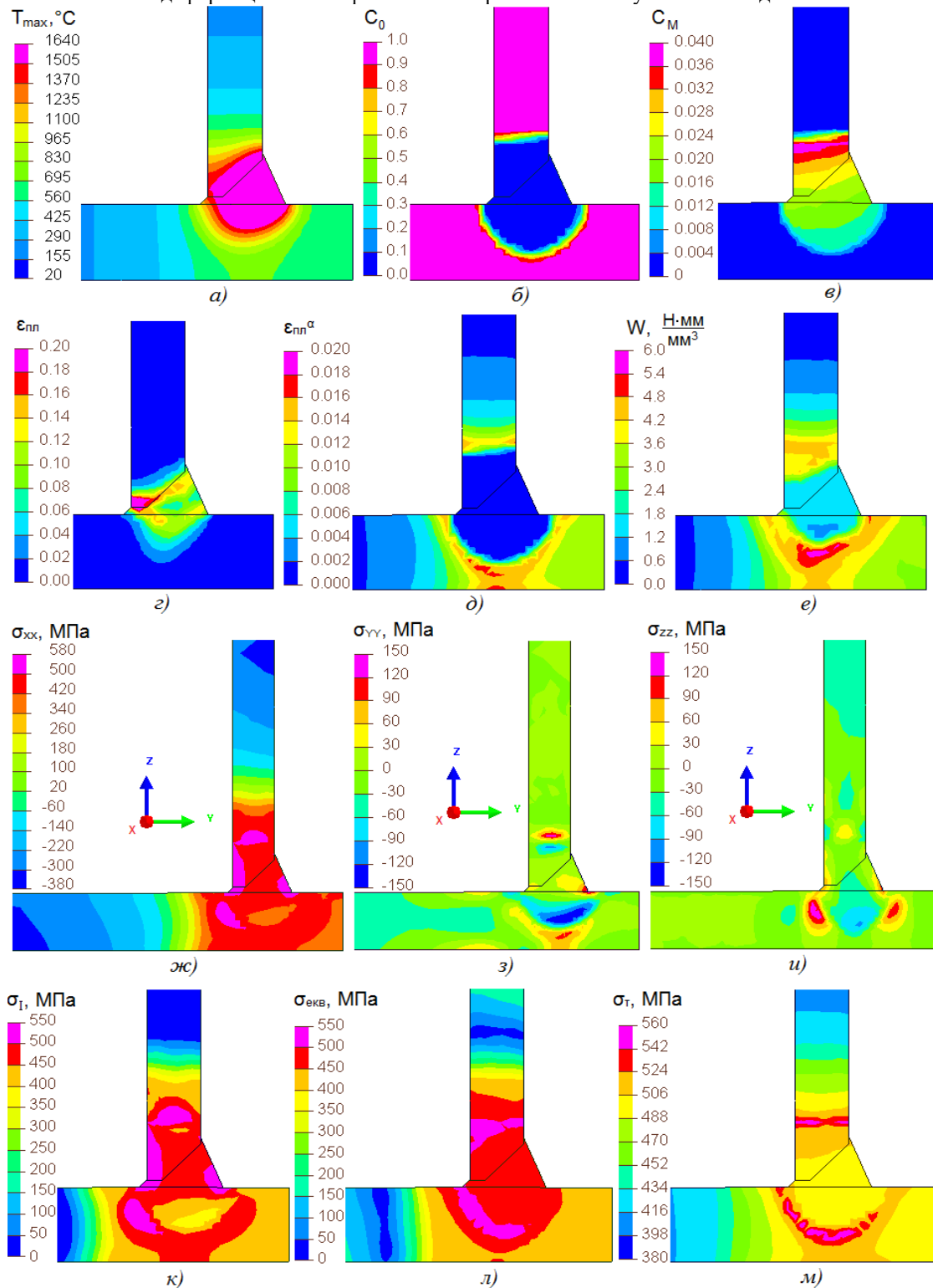


Рисунок 2. Епюри післязварного стану поясного з'єднання КБ: максимальні температури $T_{\max}$ (а), концентрація початкової структури металу C_0 (б), концентрація мартенситу C_M (в); рівень пластичних деформацій (г), рівень пластичних деформацій α -фази сталі (д), питома енергія деформування (е), нормальні залишкові напруження (ж, з, и), перші головні напруження (к), еквівалентні за Мізесом напруження (л), границя текучості після зміцнення (м)

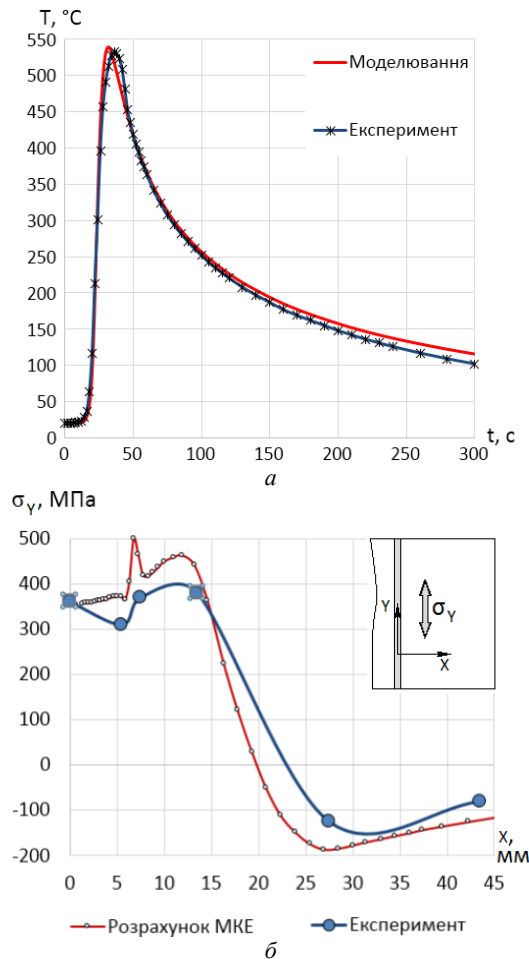


Рисунок 3. Експериментальна верифікація термічної історії $T(t)$ (а) та поздовжніх залишкових напружень $\sigma_y(x)$ (б) в зварному з'єднанні

Аналіз особливостей поясних з'єднань коробчастих балок, виконаних двостороннім швом, показав, що макродеформації (переміщення) з'єднання залежать лише від геометрії коробчастої балки, а не від положення валику, що накладається (зовнішній чи внутрішній). Найбільший вплив на післязварний напружено-деформований стан має конструктивний фактор відношення товщин пояс/стінка $k = \delta_p / \delta_s$ (рис. 2ж), а також технологічні фактори, такі як послідовність та затримка часу між накладанням валиків. Вплив цих факторів найбільш виражений за малих швидкостей зварювання ($v_{zw} \approx 2$ мм/с), при яких накладання останнім внутрішнього валику поясного з'єднання знижує залишкові напруження на 20...30 %, а пластичні деформації – в 2...2,3 рази. Мінімізація затримки між накладанням валиків додатково знижує залишкові напруження до 30 %, а пластичні деформації – до 2 разів.

Дослідження впливу наявності діафрагм або кронштейнів на післязварний напружено-деформований стан поясних з'єднань показало, що картину залишкового стану головним чином формує технологія накладання останнього з швів, яким виступає поясний

шов або шов кронштейна. Наявність привареної діафрагми при накладанні поясного шву завжди викликає збільшення залишкових напружень та пластичних деформацій стінки, рівні яких можуть сягати $1,7\sigma_T$ та 5% відповідно, і суттєво залежать від величини зазору H (рис. 2в).

Приварювання кронштейнів до стінки коробчастої балки на відстані ≤ 40 мм від поясного шву змінює термічну історію поясного з'єднання та формує в ньому картину залишкових напружень, характерну для кінцевої ділянки довгого шву. Такий стан характеризується порівняно низькими поздовжніми поясу залишковими напруженнями ($< 0,5\sigma_T$), але дуже високими пластичними деформаціями (до 8%). Мінімізація періоду затримки між накладанням розглянутих швів або попередній підігрів стінки в зонах розміщення діафрагм та кронштейнів до 1,7 разів знижує залишкові напруження, до 2,5 разів знижує пластичні деформації небезпечної ділянки стінки та забезпечує відсутність крихких структур.

Об'єктивність результатів моделювання перевірено шляхом експериментального визначення залишкових напружень у різних типах коробчастих балок. Для верифікації моделі поясного з'єднання, виконаного одностороннім швом, визначались залишкові напруження стінки коробчастої балки рами візка мостового крану вантажопідйомністю 50/16 т. Точність моделі поясного з'єднання, виконаного двостороннім швом, підтверджено визначенням структури та залишкових напружень фрагменту з'єднання в лабораторних умовах. Для криволінійного з'єднання верифікацію проведено за результатами експериментів проф. А.В. Вершинського. У всіх випадках розбіжності між розрахунковими та експериментальними результатами не перевищували допустимих меж.

Проведені дослідження показали, що жодними конструктивними та технологічними заходами з поміж розглянутих неможливо забезпечити зниження післязварних залишкових напружень до рівня $\sigma_{екв} < (\sigma_T - 150 \text{ МПа})$. Тому в нижніх поясних з'єднаннях коробчастих балок мостових кранів при перших циклах експлуатаційного навантаження практично завжди будуть виникати пластичні деформації.

Для оцінки впливу експлуатаційних навантажень на післязварний стан поясних з'єднань досліджено розподіл напружень та пластичних деформацій у верхніх і нижніх поясних з'єднаннях коробчастих балок при перших циклах навантаження (рис. 4).

Встановлено, що релаксація рівня залишкових напружень в зоні термічного впливу нижніх поясних з'єднань навіть при експлуатаційному навантаженні, близькому до границі текучості основного металу (σ_T^{OM}), становить менше 65 %, при навантаженні $R_{експл} = 0,77\sigma_T^{OM}$ поздовжні залишкові напруження зменшуються менш ніж на 45 % (рис. 4), а за типового навантаження $R_{експл} = 0,5\sigma_T^{OM}$ релаксація сягає лише

25 %. Це доводить, що нехтування залишковими напруженнями під приводом їх релаксації при експлуатації є науково необґрунтованим.

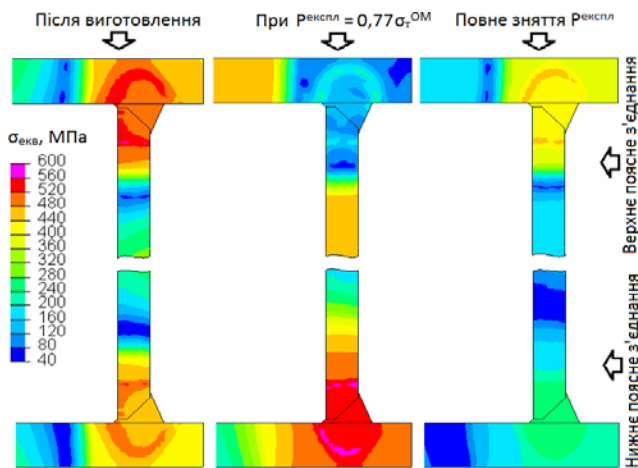


Рисунок 4 – Епюри еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ перерізу нижнього та верхнього поясного з'єднань коробчастої балки мостового крану в характерні моменти експлуатації

Аналіз циклограм напружень показав, що кожна точка поясного зварного з'єднання коробчастої балки працює за власною циклограмою напружень. Спільним для них є амплітуда циклів, тоді як середні напруження циклу різняться. Останні лінійно залежать від рівня зміцнення (границі текучості) ділянки з'єднання, що остаточно формується лише після дії максимальних експлуатаційних навантажень. Встановлено, що під час експлуатації прольотної коробчастої балки мостового крану максимальні дійсні середні напруження циклу в зоні термічного впливу поясного з'єднань спостерігаються на ділянках максимальних залишкових напружень розтягу.

Виявлено цікаву особливість роботи верхнього поясу коробчастої балки: зона залишкових напружень стиску при значній амплітуді експлуатаційного циклу навантаження також зазнає пластичних деформацій, що призводить до зниження залишкових напружень зони розтягу верхнього поясного з'єднання (рис. 4). Проте у будь-якому випадку верхній поясний шов та його зона термічного впливу працюють за циклограмою з середніми напруженнями розтягу, в протифазі до циклограми нижнього поясу.

На основі отриманих результатів розроблено характеристики дійсних циклів напружень зон максимального стиску та розтягу нижнього і верхнього поясного з'єднань коробчастих балок з урахуванням перерозподілу післязварних залишкових напружень при перших циклах експлуатації. Ці характеристики дозволяють проводити розрахунки коробчастих балок мостових кранів за передовими методиками К.П. Манжули, В.М. Юшкевича, М.О. Кликова, які комплексно враховують вплив післязварного стану з'єднання на його витривалість.

Дотримуючись методу розрахунку границі витривалості елементів металоконструкцій, запропоновано критерій оптимізації післязварного стану поясних з'єднань коробчастих балок мостових кранів у вигляді:

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

де $\sigma_{max}^{експл} = f(\sigma_{екв}, \sigma_T, \varepsilon_{пла}, R_{max}^{експл})$ – 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); $\sigma_{-1}^{p.3}$ – границя 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.

За результатами оптимізації конструктивних і технологічних параметрів коробчастих балок у діапазоні їх значень, характерних для мостових кранів, розроблено рекомендації щодо призначення конструктивних параметрів коробчастих балок, що дозволяють підвищити границю витривалості 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.

Розроблено також рекомендації щодо технології виготовлення коробчастих балок мостових кранів, що дозволяють підвищити границю витривалості на 13 % за рахунок застосування раціональних режимів зварювання та попереднього підігріву з'єднань.

Зокрема, для односторонніх поясних швів коробчастих балок мостових кранів рекомендується накладати шви зі швидкістю $v_{зв} = 12...20$ мм/с та підігрівом до $T_0 \approx 200$ °C або випереджаючим супутнім підігрівом. У випадку двостороннього шва першим валиком необхідно накладати зовнішній, виконуючи його з високою швидкістю ($v_{зв} \approx 15...20$ мм/с), а другий валик – повільніше ($v_{зв} \approx 6$ мм/с) із глибоким проплавленням в метал першого валику.

Важливо максимально скоротити затримку між накладанням валиків двостороннього поясного шву до $t_3 \approx 0,5$ хв при $v_{зв} \geq 5$ мм/с, або $t_3 = 1...2$ хв при $v_{зв} = 4...2$ мм/с відповідно. Накладати верхні поясні шви коробчастих балок рекомендується останніми (після нижніх). При наявності діафрагм їх слід у першу чергу приварювати до верхнього поясу, а потім до стінок.

Для криволінійного шва коробчастої балки змінної висоти оптимальним є виконання його першим, з напрямком від верхнього поясу до нижнього і з висо-

кою швидкістю. При зазорах $H < 4,5\delta$ доцільно виконувати місцевий супутній підігрів ділянок приварювання діафрагм на відстань 100 мм в обидва боки від діафрагми.

Розроблено методику визначення оптимальних режимів супутнього підігріву поясного з'єднання синхронним рухомим джерелом на зразках-аналогах, що дозволяє до 2-х разів знизити пластичні деформації та залишкові напруження з'єднання, не викликаючи перегріву. Запропоновано також рекомендації щодо технології післязварної термічної обробки поясних з'єднань коробчастих балок, що дозволяє уникнути утворення мартенситу та на 20–30 % знизити рівень пластичних деформацій.

Результати проведених досліджень свідчать про необхідність комплексного підходу до оптимізації післязварного напружено-деформованого стану поясних з'єднань коробчастих балок мостових кранів. Раціональний вибір конструктивних параметрів та технологічних режимів виготовлення дозволяє сформувати сприятливий післязварний стан з'єднань, що характеризується зниженим рівнем залишкових напружень та пластичних деформацій, відсутністю крихких структур та підвищеною границею витривалості.

Практична реалізація розроблених рекомендацій на виробництві підтвердила їх ефективність. Впровадження результатів досліджень у конструкторську практику та у виробництво забезпечило раціоналізацію післязварного стану поясних з'єднань коробчастих балок мостових кранів за опором багатоциклової втоми та крихкому руйнуванню, а також підвищення їх якості та загального технічного рівня.

Отримані результати дозволяють сформулювати теоретичні основи для проектування та виготовлення коробчастих балок мостових кранів з оптимальним післязварним напружено-деформованим станом. Розроблена модель післязварного стану поясних з'єднань коробчастих балок з урахуванням фазових і структурних перетворень у зонах термічного впливу дає можливість прогнозувати розподіл напружень, деформацій та структурних складових у з'єднаннях ще на етапі проектування.

Аналіз перерозподілу напружень і деформацій при перших циклах експлуатаційного навантаження сприяє більш точному прогнозуванню довговічності поясних з'єднань. Встановлені закономірності впливу конструктивних і технологічних параметрів на післязварний стан дозволяють цілеспрямовано керувати формуванням залишкового напружено-деформованого стану з'єднань для досягнення оптимальних результатів.

Важливим аспектом є також розвиток експериментальних методик визначення залишкових напружень у зонах термічного впливу зварних з'єднань. Створена експериментальна установка для визначення залишкових напружень методом свердлення глухого отвору та розроблені рекомендації щодо підвищення точності

вимірювань у зонах з високими градієнтами напружень мають самостійну наукову та практичну цінність.

Результати досліджень створюють передумови для подальшого вдосконалення методик розрахунку коробчастих балок мостових кранів на довговічність з урахуванням післязварного стану їх поясних з'єднань. Це дозволяє підвищити точність прогнозування ресурсу металоконструкцій вантажопідіймних кранів та обґрунтовано призначати міжремонтні терміни їх експлуатації.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення розробленої моделі для інших типів зварних з'єднань металоконструкцій вантажопідіймних кранів, а також на вдосконалення методик розрахунку їх довговічності з урахуванням післязварного стану. Перспективним напрямом є також розробка автоматизованих систем проектування коробчастих балок мостових кранів з оптимальним післязварним станом поясних з'єднань.

Експериментальна перевірка розроблених теоретичних положень проводилась на реальних конструкціях мостових кранів різної вантажопідіймності, що експлуатуються на промислових підприємствах України. В ході експериментальних досліджень вимірювались залишкові напруження в поясних з'єднаннях коробчастих балок методом свердлення глухого отвору з використанням розробленої установки, а також визначались структурні складові металу в зонах термічного впливу шляхом виготовлення мікрошліфів та їх дослідження методами металографічного аналізу.

Для оцінки ефективності запропонованих конструктивних і технологічних рекомендацій проведено порівняльний аналіз післязварного стану поясних з'єднань коробчастих балок, виготовлених за традиційною технологією та з урахуванням розроблених рекомендацій. Результати порівняння показали, що використання оптимальних режимів зварювання та попереднього підігріву дозволяє знизити рівень залишкових напружень розтягу в зонах термічного впливу на 25...30 % та зменшити рівень пластичних деформацій у 1,5...2 рази. При цьому відсутність крихких структур у зонах термічного впливу підтверджена металографічними дослідженнями.

Довготривалі спостереження за станом коробчастих балок мостових кранів, виготовлених з урахуванням розроблених рекомендацій, показали відсутність тріщин у поясних з'єднаннях після тривалої експлуатації, що підтверджує ефективність запропонованих заходів щодо підвищення їх границі витривалості.

Запропонований комплексний підхід до оптимізації післязварного напружено-деформованого стану поясних з'єднань коробчастих балок мостових кранів може бути поширений на інші типи зварних металоконструкцій, що працюють в умовах циклічних навантажень. Це відкриває перспективи для подальшого розвитку та вдосконалення методів проектування та виготовлення відповідальних зварних конструкцій з підвищеною надійністю та довговічністю.

Висновки

На основі комплексного дослідження післязварного напружено-деформованого стану поясних з'єднань коробчастих балок мостових кранів отримано такі результати:

Розроблено і верифіковано модель післязварного стану поясних з'єднань коробчастих балок мостових кранів, що враховує фазові та структурні перетворення в зонах термічного впливу. Встановлено, що положення екстремумів залишкових напружень та пластичних деформацій залежить переважно від максимальної температури, досягнутої при зварюванні: максимальне структурне зміцнення спостерігається при $T_{\max} \approx 1100^\circ\text{C}$, максимальний рівень залишкових напружень – при $T_{\max} \approx 867^\circ\text{C}$, а максимальний рівень пластичних деформацій – при $T_{\max} \approx 727^\circ\text{C}$.

Виявлено, що величини максимальних залишкових напружень та пластичних деформацій залежать від режимів нагріву й охолодження та параметрів геометрії поясного з'єднання, а не від габаритів коробчастої балки. Доведено, що для об'єктивного моделювання післязварного стану достатньо розглядати фрагмент коробчастої балки розміром не менше 300×300 мм.

Встановлено, що для поясних з'єднань коробчастих балок, виконаних двостороннім швом, найбільший вплив на післязварний напружено-деформований стан має конструктивний фактор відношення товщин поясу до стінки та технологічні фактори: послідовність і затримка часу між накладанням валиків. Доведено, що накладання останнім внутрішнього валика знижує залишкові напруження на 20...30 %, а пластичні деформації – в 2...2,3 рази.

Для криволінійних з'єднань коробчастих балок змінної висоти виявлено формування додаткових дотичних залишкових напружень, які досягають 150...300 МПа залежно від радіусу переходу, що необхідно враховувати при проектуванні.

Визначено, що при перших циклах експлуатаційного навантаження релаксація залишкових напружень у зонах термічного впливу нижніх поясних з'єднань становить не більше 65 % навіть при навантаженні, близькому до границі текучості основного металу. При типовому рівні експлуатаційного навантаження (50% від межі текучості) релаксація сягає лише 25%, що підтверджує необхідність врахування післязварного стану при розрахунках на довговічність.

Запропоновано критерій оптимізації післязварного стану поясних з'єднань – кінцеву границю текучості ділянки максимальних залишкових напружень після дії максимального експлуатаційного навантаження, що комплексно враховує вплив стану зварних з'єднань на їх границю витривалості.

Розроблено рекомендації щодо конструктивних параметрів коробчастих балок мостових кранів та технології їх виготовлення, що дозволяють до 1,23 раз підвищити границю витривалості поясних з'єднань. Прак-

тичне застосування цих рекомендацій забезпечує раціоналізацію післязварного стану поясних з'єднань за опором багатоцикловій втомі та крихкому руйнуванню.

Комплексний характер проведених досліджень та отриманих результатів створює передумови для подальшого удосконалення методик проектування та виготовлення коробчастих кранових балок з оптимальним рівнем залишкових напружень та підвищеною довговічністю.

Список літератури

1. Fatigue strength of laser-welded thin-plate ship structures based on nominal and structural hot-spot stress approach / W. Fricke, H. Remes, O. Feltz and etc. // *Ships and Offshore Structures*. – 2015. – Vol. 10 (1). – P. 39–44. <https://doi.org/10.1080/17445302.2013.850208>.
2. Review on fracture and crack propagation in weldments – A fracture mechanics perspective / U. Zerbst, R.A. Ainsworth, H.T. Beier and others // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2014. – Vol. 132. – P. 200–276. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.05.012>.
3. Barsoum Z. Fatigue of high strength steel joints welded with low temperature transformation consumables / Z. Barsoum, M. Gustafsson // *Engineering Failure Analysis*. – 2009. – Vol. 16, № 7. – P. 2186–2194. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.02.013>.
4. Zhu X.K. Effects of temperature-dependent material properties on welding simulation / X.K. Zhu, Y.J. Chao // *Computers & Structures*. – 2002. – Vol. 80 (11). – P. 967–976. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(02\)00040-8](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(02)00040-8).
5. Deng D. Numerical simulation of welding distortion in large structures / D. Deng, H. Murakawa, W. Liang // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2007. – Vol. 196 (45–48). – P. 4613–4627. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2007.05.023>.
6. Balasubramanian V. Effect of welding processes on toe cracking behaviour of pressure vessel grade steel / V. Balasubramanian, B. Guha // *Engineering Failure Analysis*. – 2004. – Vol. 11 (4). – P. 575–587. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2003.09.005>.
7. The effect of heat input on residual stress distribution of steel welds measured by neutron diffraction / A.M. Paradowska, J.W.H. Price, R. Ibrahim and others // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2006. – Vol. 17 (1–2). – P. 385–388.
8. Effect of welding sequence on residual stress and distortion in flat-bar stiffened plates / L. Gannon, Y. Liu, N. Pegg and others // *Marine Structures*. – 2010. – Vol. 23 (3). – P. 385–404. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2010.05.002>.
9. Pei G. Prediction system for overhead cranes based on digital twin technology / G. Pei, W. Zongyan, Z. Yuting, L. Menglong // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13. – P. 4696. <https://doi.org/10.3390/app13084696>.
10. Стрельбіцький В. В. Дослідження впливу механізму пересування на ресурс металоконструкції мосто-

вих кранів морських портів / В. В. Стрельбіцький // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2022. – №3. – С. 249-253. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-309-3-249-253>.

11. Svirgun O. Stress-deformed state research of the main girder in the single-girder crane and selection of a rational section / O. Svirgun, G. Gnatenko, V. Svirgu, V. Svirgun // Ukrainian Journal of Applied Economics. – 2021. – P. 273-279. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2021-4-33>.

12. Стрельбіцький В. В. Експериментальне дослідження впливу напрацювання на тріщиностійкість сталей мостових кранів / В. В. Стрельбіцький // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2020. – № 4. – С. 138–142.

13. Duong T. Reasonable design method of box crane girder by Taguchi method / T. Duong // Journal of Applied Engineering Science. – 2024. – Vol. 22. – P. 100–112. <https://doi.org/10.5937/jaes0-45536>.

14. Kiviluoto S. Modelling and control of vertical oscillation in overhead cranes / S. Kiviluoto, L. Eriksson, H. Koivo // Proceedings of the American Control Conference. 01-03 July 2015. – 2015. – P. 1290–1295. <https://doi.org/10.1109/ACC.2015.7170911>.

15. Abid M. Design optimization of box type girder of an overhead crane / M. Abid, H. Akmal, H. Wajid // Iranian Journal of Science and Technology: Transactions of Mechanical Engineering. – 2015. – Vol. 39. – P. 101–112.

Одержано 14.05.2025

OPTIMIZATION OF STRESS-STRAIN STATE IN CHORD JOINTS OF BOX GIRDERS IN BRIDGE CRANES

Mykhailo Sydorenko Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machine Elements and Hoisting and Transport Mechanisms, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: sidorenko.mik@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9097-9739

Vasyl Liaturynskyi Candidate of Technical Sciences, Chief ingeneer, “Lifting machines plant” LLC, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: vasilyliat@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7487-0696

Roman Frolov Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Machine Elements and Hoisting and Transport Mechanisms, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, ORCID: 0009-0001-8769-8848

Purpose. To enhance the fatigue limit and plasticity of chord joints in bridge crane box girders by optimizing their post-welding stress-strain state through rational combination of structural and technological parameters.

Research methods. The mechanical method of determining actual stresses by drilling blind holes was used to analyze residual stresses in heat-affected zones of welded joints. The finite element numerical method was employed for modeling the technological state of welded joints. Methods of mathematical experiment planning and statistical processing of experimental data were utilized. Metallographic methods were applied to investigate the structure of the heat-affected zone in welded joints.

Results A theoretical model of the post-welding stress-strain state of chord joints in box crane girders was developed, taking into account phase and structural transformations in heat-affected zones. Empirical dependencies on the influence of technological manufacturing parameters and structural parameters of girders on the post-welding state of their chord joints were established. Patterns of redistribution of residual stresses and plastic deformations during the first loading cycles were determined. A criterion for optimizing the post-welding state was proposed – the final yield strength of the area of maximum residual stresses after maximum operational loading. Scientifically-based structural and technological recommendations were developed, allowing up to 1.23 times increase in the fatigue limit of chord joints in box girders of bridge cranes.

Scientific novelty The study proposes a theoretical model of the post-welding stress-strain state of chord joints that accounts for phase and structural transformations in heat-affected zones. Empirical dependencies and patterns of the influence of manufacturing technology parameters and design on the post-welding state were established. Patterns of redistribution of residual stresses and plastic deformations during the first loading cycles of cranes were determined.

Practical value. Structural and technological recommendations were developed to increase the fatigue limit of chord joints in box girders. Characteristics of actual stress cycles were obtained, which take into account the level of residual stresses and plastic deformations of the first operational cycles. Recommendations for determining stresses and modeling the post-welding state of metal structures were developed.

Key words: box girder, bridge crane, welding, residual stresses, plastic deformations, heat-affected zone, fatigue limit, post-welding state, crack resistance.

References

1. Fricke, W., Remes, H., Feltz, O., Lillemäe, I., Tchuindjang, D., Reinert, T., Nevierov, A., Sichermann, W., Brinkmann, M., Kontkanen, T., Bohlmann, B., Molter, L. (2015). Fatigue strength of laser-welded thin-plate ship structures based on nominal and structural hot-spot stress approach. *Ships and Offshore Structures*, 10(1), 39–44. <https://doi.org/10.1080/17445302.2013.850208>.
2. Zerst, U., Ainsworth, R.A., Beier, H.T., Pisarski, H., Zhang, Z.L., Nikbin, K., Nitschke-Pagel, T., Münstermann, S., Kucharczyk, P., Klingbeil, D. (2014). Review on fracture and crack propagation in weldments – A fracture mechanics perspective. *Engineering Fracture Mechanics*, 132, 200–276. <https://doi.org/10.1016/j.eng-fractmech.2014.05.012>.
3. Barsoum, Z., Gustafsson, M. (2019). Fatigue of high strength steel joints welded with low temperature transformation consumables. *Engineering Failure Analysis*, 97, 635–649. <https://doi.org/10.1016/j.eng-failanal.2019.01.017>.
4. Zhu, X.K., Chao, Y.J. (2002). Effects of temperature-dependent material properties on welding simulation. *Computers & Structures*, 80(11), 967–976. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(02\)00040-8](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(02)00040-8).
5. Deng, D., Murakawa, H., Liang, W. (2007). Numerical simulation of welding distortion in large structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 196(45–48), 4613–4627. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2007.05.023>.
6. Balasubramanian, V., Guha, B. (2004). Effect of welding processes on toe cracking behaviour of pressure vessel grade steel. *Engineering Failure Analysis*, 11(4), 575–587. <https://doi.org/10.1016/j.eng-failanal.2003.09.004>.
7. Paradowska, A.M., Price, J.W.H., Ibrahim, R., Finlayson, T.R. (2006). The effect of heat input on residual stress distribution of steel welds measured by neutron diffraction. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 17(1–2), 385–388.
8. Gannon, L., Liu, Y., Pegg, N., Smith, M. (2010). Effect of welding sequence on residual stress and distortion in flat-bar stiffened plates. *Marine Structures*, 23(3), 385–404. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2010.05.002>.
9. G. Pei, W. Zongyan, Z. Yuting, L. (2023). Menglong Prediction system for overhead cranes based on digital twin technology. *Applied Sciences*, 13, 4696. <https://doi.org/10.3390/app13084696>.
10. Strelbitskiy V. (2022). Research of the influence of the movement mechanism on the resource of metal structures of overhead cranes of seaports. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, 3, 249–253. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-309-3-249-253>.
11. O. Svirgun, G. Gnatenko, V. Svirgu, V. Svirgun (2021). Stress-deformed state research of the main girder in the single-girder crane and selection of a rational section. *Ukrainian Journal of Applied Economics*, 273–279. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2021-4-33>.
12. Strelbitskiy V. (2020). Experimental study of the effect of operating time on the crack resistance of bridge crane steels. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, 4, 138–142.
13. Duong T. (2024). Reasonable design method of box crane girder by Taguchi method. *Journal of Applied Engineering Scienc*, 22, 100–112. <https://doi.org/10.5937/jaes0-4553614>.
14. S. Kiviluoto, L. Eriksson, H. Koivo Modelling and control of vertical oscillation in overhead cranes. *Proceedings of the American Control Conference*. 01–03 July 2015, 1290–1295. <https://doi.org/10.1109/ACC.2015.7170911>.
15. M. Abid, H. Akmal, H. Wajid (2015). Design optimization of box type girder of an overhead crane Iranian *Journal of Science and Technology: Transactions of Mechanical Engineering*, 39, 101–112.