

УДК 621.873

М.В. Сидоренко, доцент, канд. техн. наук,

В.О. Лятуринський, асистент

*Запорізький національний технічний університет
вул. Жуковського 64, м. Запоріжжя, Україна, 69063*

E-mail: vasilyiat@gmail.com

ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ АНАЛІЗУ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В КРАНОВИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЯХ ТА ДЕТАЛЯХ НА ОСНОВІ КОГЕРЕНТНОЇ ОПТИКИ

Пропонується комбінація методу спекл-інтерферометрії зі свердлінням отвору для аналізу залишкових напружень. Представлено пристрій для проведення замірів. Розраховано чутливість та позначені границі використання способу згідно схемі та матеріалам. Обґрунтована доцільність використання запропонованої методики.

Ключові слова: *вантажопідійомний кран, спекл-інтерферометрія, залишкові напруження.*

Вступ. Металеві конструкції вантажопідійомних кранів складають 70...80% від маси крану, визначають його вартість та довговічність. Більшість з них це зварні коробчасті конструкції. Номенклатура поширених в Україні для них сталей достатньо вузька: ВСт3сп, 09Г2, 09Г2С. Рідше використовується: 10ХСНД, 15ХСНД; 10Г2С1. Але частка саме легованих сталей з високою межею текучості стрімко зростає останнє десятиліття, особливо це спостерігається в країнах Європи та США. Наприклад сталі S890QL, S690ML та інші за стандартом EN 10025 : 2004.

В зонах термічного впливу зварного з'єднання зазвичай спостерігається початок руйнування динамічно навантаженої кранової металокопункції. Особливо небезпечними є зони місцевої концентрації декількох зварних швів, які можна спостерігати на кінцевих балках мостових кранів. Руйнування може початися через те, що номінальні робочі напруження ділянки складаються з залишковими зварними напруженнями і в сумі перевищують межу витривалості матеріалу. В сприятливих умовах поява мікротекучості знімає значну частину залишкових напружень без значного впливу на міцність зони. Але в умовах недостатньої пластичності навколошовної зони, несприятливої структури, додаткових концентраторів напружень, тощо, – перевищення напруженнями розтягу границі витривалості викликає появу мікротріщини, яка росте та спричиняє малу довговічність вузла. Вказані вище високоміцні сталі особливо чутливі до концентраторів напружень, та мають високі значення залишкових напружень після зварювання. Для кранових металокопункцій відповідно до Правил [1]: «...необхідність і методи термічної обробки зварних з'єднань несучих елементів металокопункцій установлюються технічними умовами на виготовлення, ...». Написання раціональних технічних умов по обробці зварних з'єднань неможливе без інформації про значення залишкових напружень.

Розрахункові методи визначення залишкових зварних напружень складні та недостатньо достовірні, зазвичай мають жорсткі рамки своєї адекватності. Тому на перший план виходять методики виміру залишкових напружень, що можуть використовуватись для оптимізації технології виготовлення конструкцій та деталей.

Таким чином, обґрунтування достатньо дешевої, оперативної та універсальної методики заміру залишкових напружень для розробки раціональних заходів по їх зняттю при виготовленні високовідповідальних елементів кранових металокопункцій є актуальною задачею.

Завданням публікації є вибір та обґрунтування методики вимірювання залишкових напружень, що виникають при зварюванні типових кранових металевих конструкцій. Зазначена методика повинна задовольняти наступним вимогам: прийнятна точність виміру, оперативність отримання результатів, можливість автоматизації та зберігання інформації в електронному вигляді, прийнятна вартість.

1. Метод виміру залишкових напружень

В наш час використовуються як фізичні (магнітні, акустичні, рентгенівські, вихрострумові) так і механічні (відокремлення, зняття шару, канавки, отвору) методи виміру залишкових напружень в металах. Причому останні мають вищу достовірність, оперативність, точність та часто більш прості в реалізації. Головним недоліком механічних методів є необхідність часткового або повного руйнування зразку. В ідеалі, магнітні та електричні методи більш перспективні, але для їх тарування бажано використовувати достовірний фізичний метод.

Для аналізу залишкових напружень зразків зварних з'єднань металокопункцій кранів з-поміж перерахованих вище методів було обрано метод глухого отвору, що також є дуже поширеним в світовій практиці. Він малоруйнівний, оперативний, достовірний, відносно дешевий. Метод отвору з тензометруванням поверхневих деформацій відповідає стандарту США E-837-08 [2]. Але використання

тензорезисторів має такі недоліки як неповноцінність картини деформацій, усереднення деформацій, підвищення вимог до обробки поверхні зразка та приклеювання датчиків, коштовність малобазових датчиків. Тому розглядалися альтернативні варіанти заміру переміщень контуру отвору, серед яких було обрано методи когерентної оптики. Багато літератури та публікацій присвячено використанню голографічної інтерферометрії, спекл-фотографії та іншим оптичним методам виміру мікропереміщень. Було встановлено, що з-поміж них спекл-інтерферометрія, ввівши в себе типові переваги оптичних методів (безконтактність, швидкість, точність, наочність), найбільш відповідає зазначеним вище вимогам. Розглянемо детальніше цю перспективну методику для дослідження напруженого стану кранових металлоконструкцій та розрахуємо необхідні параметри для її реалізації.

Метод глухого отвору

Метод глухого отвору було запропоновано І. Матаром ще в 1932 році. Суть методу полягає в тому, що залишкові напруження в зразку після видалення циліндричного об'єму металу (свердління отвору) спричиняють пружні деформації поверхні металу навколо отвору. Фіксація цих переміщень та рішення задачі Кірша дозволяє знайти значення усереднених залишкових напружень в зразку. За стандартом США E-837-08 [2] переміщення в цьому методі фіксуються спеціальною трьохелементною тензорозеткою. Через зазначені вище недоліки тензометрування пропонується використання методу електронної спекл-інтерферометрії.

Електронна спекл-інтерферометрія

Метод базується на тому, що при освітленні шорсткої поверхні когерентним світлом зображення має зернистість (спекл-структуру). Зображення спеклів виникає через те, що кожна точка дифузно-відбиваючої поверхні розсіює світло, яке потім інтерферує зі світлом, розсіяним сусідніми точками поверхні. Якщо поверхню освітити двома однаковими симетрично падаючими лазерними пучками (рисунок 1), то зображення спекл-структури буде отримано в результаті інтерференції відбитих розсіяних променів. Якщо точки поверхні змістяться по вертикалі (рисунок 1), то це призведе до різності ходу інтерферуючих хвиль, що викликає зміну розподілу інтенсивності спекл-структури. За допомогою відеокамери записуються картини спеклів до переміщень точок поверхні і після. Отримані відеосигнали зберігаються на ПК, а потім віднімаються один від одного за допомогою спеціалізованих програм. В результаті зміни розподілу інтенсивності маємо спекл-інтерферограму у вигляді картини кореляційних полос. Кожна полоса є геометричним місцем точок поверхні зразку з рівними переміщеннями.

Ця схема була взята за базову в запропонованому пристрої, бо, попри те що більшість з розповсюджених оптичних методик вимірювання деформацій фіксують нормальні зміщення поверхні (простіша реалізація), проведено кінцево-елементне моделювання в програмному комплексі ANSYS показало, що нормальні переміщення точок контуру отвору в 2,9 рази менші за дотичні (сталь 09Г2С, $d_{\text{отвору}} = 1,6 \text{ мм}$). Тому для об'єктивної картини деформацій поверхні краще безпосередньо фіксувати зміщення точок поверхні в її площині.

Метод електронної спекл-інтерферометрії в нашій схемі має наступні переваги: відсутність одноразових елементів, оперативність, безпосереднє визначення полів тангенційних переміщень поверхні в необхідному напрямі, комп'ютерна обробка отриманої цифрової інформації, використання стандартних елементів в схемі пристрою, мале руйнування зразку, можливість аналізу багатьох зон одного зразку (встановлено, що отвори можна виконувати \approx через кожні $6 d_{\text{отвору}}$).

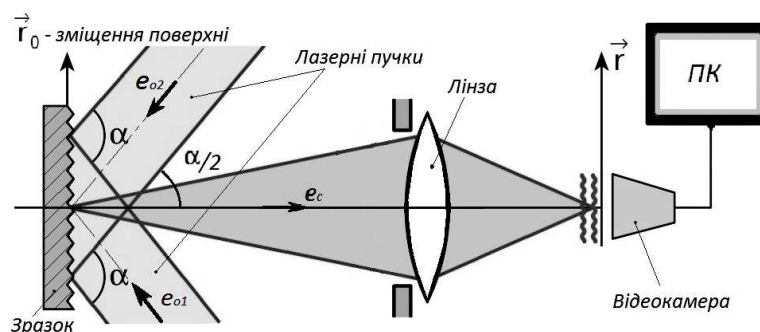


Рисунок 1 – Оптична схема виміру тангенційних мікропереміщень точок зразку методом спекл-інтерферометрії

2. Пристрій для виміру залишкових напружень

Створений пристрій (рисунок 2) складається з оптичної та механічної частини. В оптичній частині лазерний промінь, розширений з початкового діаметра 4 мм до 32 мм за допомогою розширювача пучку, потрапляє на напівпрозоре дзеркало. Проходить ділення променя за амплітудою. Перший пучок половиною свого фронту безпосередньо падає на поверхню зразку, а другою половиною падає на ту ж

саму поверхню після відбиття від дзеркала 3, встановленого на поверхні зразку. За для досягнення інтерферометричного ефекту дзеркало встановлюємо під кутом 90° до поверхні, щоб відбита частина проміню падала під тим самим кутом, що і падаюча безпосередньо. Другий пучок після направлення проміжним дзеркалом 1 також ділиться за фронтом дзеркалом на поверхні зразку. Розміщення дзеркал забезпечує падіння пучків під кутом 60° до нормалі поверхні, але в взаємоперпендикулярних оптичних площинах. Схема забезпечує вимірювання переміщень точок поверхні в двох тангенційних напрямках, у зоні ефективним діаметром 24 мм. Чого за проведеними нами розрахунками буде достатньо для будь-яких конструкційних сталей з отворами діаметром менше 2,5 мм.

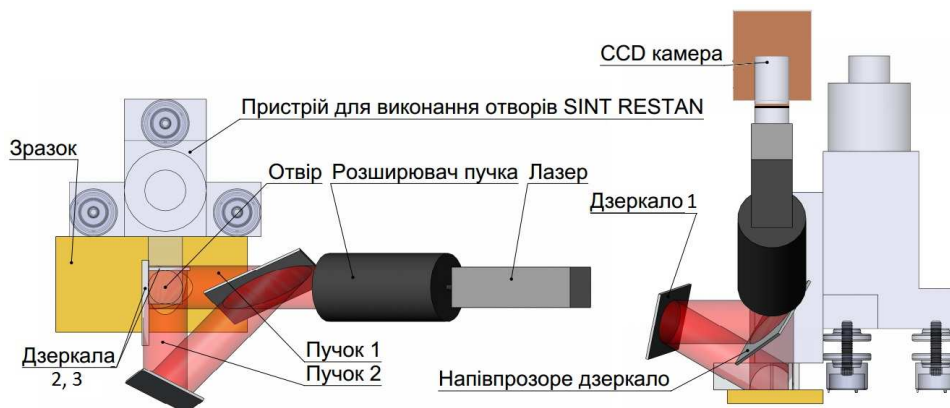


Рисунок 2 – Пристрій для виміру залишкових напружень

Була розрахована потужність лазерного променя, що має відповідати границі чутливості CCD камери, з урахуванням ступеня розширення пучку та відбиваючої здатності поверхні зразку. В результаті було обрано напівпровідниковий лазер потужністю 15 мВт, довжина хвилі 650 нм.

Механічною частиною є спеціальний прибор SINT RESTAN 2000 (Італія) який забезпечує покрокове свердління отвору (рисунок 3).

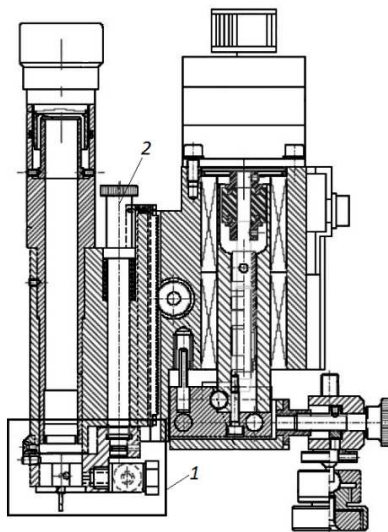


Рисунок 3 – Прибор для високоточного свердління отворів SINT RESTAN 2000

Прибор забезпечує обертання блоку з пневматичною турбінкою та свердлом 1 навколо вертикальної осі 2, що відкриває зону для оптичних вимірювань. Також з ним можна використовувати й звичне тензометрування. За стандартом Е-837-08 при тензометруванні деформацій товстого зразку від глухого отвору, свердління необхідно виконувати мінімально в 8 кроків рівної глибини (при рівномірному розподілу напружень за глибиною зразку). Для підвищення точності та можливості аналізу зміни напруженого стану по товщині зразку необхідно виконувати отвір в 25 кроків, а оптимально – в 40. Прибор SINT RESTAN може виконувати отвори з кроком глибини 0,015 мм, що для свердла діаметром 2 мм забезпечує 133 заміри (при глибині свердління 2 мм). Використовуються спеціальні свердла діаметрами до 2,2 мм. Максимальна частота обертання свердла 300000 об/хв.

3. Теоретичне обґрунтування методики

Розрахуємо теоретичну чутливість методу спекл-інтерферометрії в запропонованій схемі (рисунок 1). Нехай \vec{r}_0 – вектор переміщення точки поверхні тіла; \vec{e}_o, \vec{e}_c – одиничні вектори напрямку освітлення спостереження; λ – довжина хвилі лазерного променя. Зміну фази випромінювання, викликану деформацією об'єкта δ в загальному вигляді можна розрахувати як:

$$\delta = \frac{2 \cdot \pi \cdot \vec{r}_0 \cdot (\vec{e}_c - \vec{e}_o)}{\lambda}.$$

Вважаємо, що поверхня зміщується вертикально (рисунок 1), тоді переміщення поверхні $r_y = |\vec{r}_0|$. Кути освітлення лазерних пучків відрізняються лише знаком, тому для проекцій на вісь y зміна різниці фаз першого і другого пучків прийме вигляд:

$$\delta_1 - \delta_2 = \frac{4 \cdot \pi \cdot r_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{\lambda}.$$

В цьому методі зручно те, що зміщення в напрямках, перпендикулярних до вертикального вектору \vec{r}_0 (рисунок 1) не впливають на зміну фаз, тому зняття результатів від пучків 1 і 2 можна проводити незалежно, по черзі. Нормальні зміщення поверхні зразку не будуть впливати на результат. Різниця фаз для світлих і темних полос відповідно:

$$\delta_{св} = 2 \cdot \pi \cdot n; \delta_{темн} = (2 \cdot n + 1) \cdot \pi,$$

де n – ціле число.

Отримання відповідно світлих та темних полос буде спостерігатися при переміщеннях, (нм):

$$r_y = \frac{n \cdot \lambda}{2 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{n \cdot 650}{2 \cdot \sin 60} = 375 \cdot n; \quad r_y = \frac{(2 \cdot n + 1) \cdot \lambda}{2 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} = 375 \cdot (n + 0,5).$$

Отже теоретична чутливість виміру деформацій по кількості полос за схемою складатиме 375 нм, або 187,5 нм при можливості повноцінного виділення всіх світлих і темних полос кореляції.

На рисунку 4 запропонована графічна інтерпретація типової картини інтерференційних полос виміру переміщень (напрямок y при $\sigma_x = -\sigma_y$), тут Δy – абсолютні зміщення точок поверхні з координатами y . Реальна ефективна зона виміру мікропереміщень буде обмежена зоною кромки отвору, бо останні полоси (6, 7 на рисунку 4) практично невидимі навіть при високій чистоті експерименту.

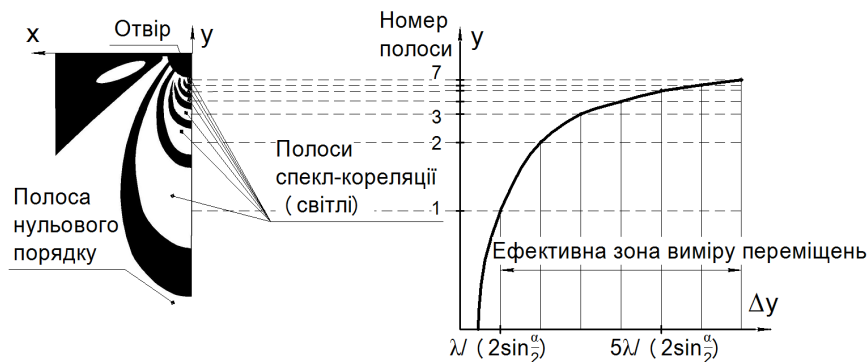


Рисунок 4 – Інтерпретація інтерференційних полос

Для зварних з'єднань кранових металевих конструкцій залишкові напруження є змінними за глибиною основного металу (зразку), особливо це виконується при великих товщинах та багат шаровості швів. В будь-якому випадку найбільше нас цікавлять напруження шарів, близьких до поверхні, як тих що найбільш впливають на працездатність вузла. Тому глибина отвору до 2 мм буде достатньою для аналізу. Відповідно до стандарту Е-837-08 [2] всі зразки кранових металевих конструкцій будуть вважатися товстими ($s_{зразку} > 1,2 \cdot D_{отвору}$), бо в їх відповідальних вузлах не використовується метал товщиною $s < 5$ мм. Для розрахунку напруженого стану зони навколо отвору є декілька методів. Зазвичай при тензометруванні це: ASTM Е 837-08 [2]; інтегральний метод Шаєра [3]; метод Кокельмана [4]. Кожен з них дає можливість аналізу розподілу напружень за глибиною зразку.

Був проведений розрахунок полів при різних напружених станах. На рисунку 5 представлено накладення полів рівних переміщень по двом осям. Такі поля можна отримати в результаті комп'ютерної

обробки спекл-інтерферограмм з виділенням точок максимальної і мінімальної інтенсивності та фільтрації випадкових змін інтенсивності (шумів). Для використання методів, що прийняті при тензометруванні необхідно лише розрахувати сумарні зміщення точок поверхні по бісектрисі кута між осями проведених замірів (рисунок 5). Інший метод полягає в приведенні полів переміщень до полярних координат.

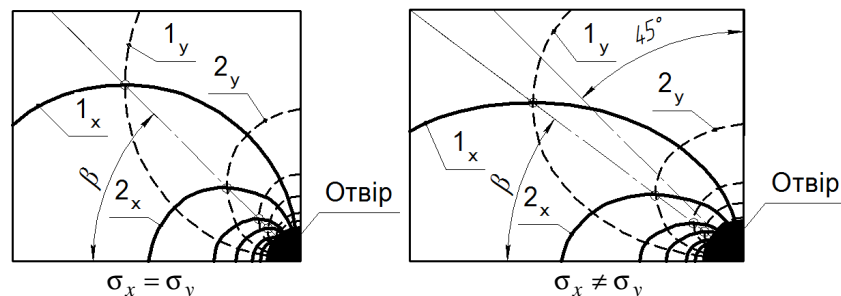


Рисунок 5 – Накладення інтерфераційних полос переміщень в 2-х напрямках

Змодельємо поле залишкових деформацій яке можна виявити запропонованим пристроєм при свердлінні отвору в зразку сталі 09Г2С. В зразку існують одновісні залишкові напруження розтягу рівня 200 МПа. Для знаходження поля деформацій при свердленні неглибокого глухого отвору необхідно вирішити задачу в рамках тривимірної теорії пружності. Поверхня зразка плоска, розміри зразка значно більші за розміри отвору, залишкові напруження є постійними в об'ємі зони аналізу. Тіло з отвором має залишкові напруження $\sigma_x = 200 \text{ МПа}$; отвір має глибину $H = 1,6 \text{ мм}$, радіус $R = 0,8 \text{ мм}$.

Рішення проводилося в програмному комплексі ANSYS, на рисунку 6, б показано розрахований розподіл інтерфераційних полос (світлих та темних) при аналізі деформацій вздовж осі x для зазначеного вище випадку. Відмічено, що картини інтерфераційних полос (полів деформацій) в залежності від напрямку осі спостереження та співвідношення повздовжніх та поперечних залишкових напружень мають 2-х (рисунок 6, б), 4-х та 6-ти (рисунок 6, а) пелюстковий вигляд.

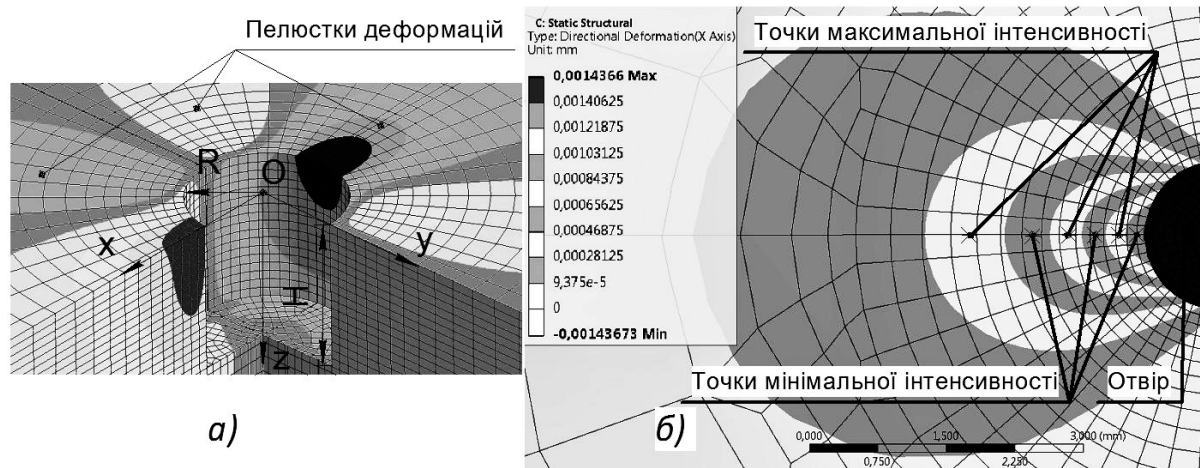


Рисунок 6 – Моделювання деформацій поверхні зразку

В результаті чисельного експерименту встановлено, що єдину інтерфераційну полосу можна спостерігати з напружень розтягу близько 50 МПа, але її виявлення буде проблематичним через близькість до кромки отвору. Встановлено, що розрахунок залишкових напружень лише за кількістю полос буде мати малу точність, особливо при відносно малих напруженнях через те, що останні полоси (біля отвору) дуже важко розділити і знайдена їх кількість завжди буде мати похибку ± 1 полоса. Моделювання деформацій при різній глибині отвору вказало на те, що підвищення глибини з $0,6d_{\text{отвору}}$ до $d_{\text{отвору}}$ мало впливає на вимірювані переміщення поверхні зразку. Тому при відсутності необхідності аналізу розподілу залишкових напружень за глибиною, свердління на глибину більше $0,6d_{\text{отвору}}$ є зайвим. Цей висновок розширює можливості використання методики на реальних конструкціях, бо глибина отвору $\leq 1 \text{ мм}$ в багатьох випадках відчутно не вплине на працездатність металоконструкції.

Для підвищення точності та рівня автоматизації вимірювань необхідна система комп'ютерної інтерпретації піків інтенсивності цифрового зображення (рисунок 6, б) в реальні координати точок

рівних деформацій на зразку. Завдяки отриманим значенням переміщень можна буде вирішити зворотну від приведені тут задачу в тому ж комплексі ANSYS. Автоматизація такої обробки є важливим пунктом подальшого удосконалення приведені методики виміру залишкових напружень.

Сфера використання пристрою не обмежується лише зварними з'єднаннями вантажопідіймальних машин. Одним з перспективним напрямів є аналіз кранових коліс, де механічна і термічна обробка призводить до великих значень залишкових напружень, які на сьогодні не аналізуються через відсутність оперативних і достатньо точних методик.

Висновки

Запропонована перспективна методика визначення залишкових напружень в вузлах кранових металоконструкцій, що поєднує спекл-інтерферометрію зі свердлінням отвору. Наведено теоретичне обґрунтування запропонованої методики вимірювання та аналізу отриманих результатів.

Змодельовано розподіл деформацій при аналізі залишкових напружень, а також розраховано теоретичні показання запропонованого пристрою. Визначено границі використання запропонованого способу вимірювання для кранових металоконструкцій. Доведена можливість та обґрунтована доцільність використання пристрою та описаної методики для аналізу залишкових напружень кранових металоконструкцій та деталей.

Планується проведення комплексу випробувань зразків кранових металоконструкцій та деталей для створення рекомендацій щодо регулювання залишкових напружень.

Бібліографічний список використаної літератури

1. НПАОП 0.00-1.01-07. Правила будови і безпечної експлуатації вантажопідіймальних кранів. — Харків: Індустрія, 2008. — 368 с.
2. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method / ASTM Stand. E 837-08. — Philadelphia, 2008.
3. Schajer G. Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling Method. Part I, II / G. Schajer // Journal of Engineering Materials and Technology. — 1988. — Vol. 110. — P. 338-349.
4. Schwarz T. The hole-drilling method – the best technique for the experimental determination of residual stresses in many fields of application / T. Schwarz, H. Kockelmann // МТВ 29. — 1993. — Vol. 2. — P. 33-38.

Надійшла до редакції 19.04.2013 р.

Сидоренко М.В., Лятуринский В.А. Обоснование методики анализа остаточных напряжений в крановых металлоконструкциях и деталях на основе когерентной оптики

Предлагается комбинация метода спекл-интерферометрии со сверлением отверстия для анализа остаточных напряжений. Представлено устройство для проведения замеров. Рассчитана чувствительность и обозначены границы использования способа в соответствии со схемой и материалами. Обоснована целесообразность использования предложенной методики.

Ключевые слова: грузоподъемный кран, спекл-интерферометрия, остаточные напряжения.

Sidorenko M.V., Lyaturinsky V.A. Specification of the residual stress analysis methodology in metal constructions and parts of cranes based on coherent optics

The combination of speckle interferometry method with drilling hole for the residual stresses analysis is proposed in the paper. The device for measurements is presented. Sensitivity is calculated and the method limits are identified according to the scheme and materials. The usefulness of the proposed methodology is substantiated.

Keywords: crane, speckle interferometry, residual stresses.