

УДК 621.873

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ МЕТОДОМ СВЕРДЛЕННЯ ГЛУХОГО ОТВОРУ

ЛЯТУРИНСЬКИЙ В. О. <sup>1\*</sup>,  
СИДОРЕНКО М. В. <sup>2</sup>, *к.т.н.*

<sup>1\*</sup> Кафедра деталей машин і підійомно-транспортних механізмів, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (0689) 79-58-04, e-mail: [vasilyliat@gmail.com](mailto:vasilyliat@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7487-0696

<sup>2</sup> Кафедра деталей машин і підійомно-транспортних механізмів, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, ORCID ID: 0000-0002-9097-9739

**Анотація.** В сучасному виробництві зварних конструкцій вантажопідійомних кранів необхідна об'єктивна інформація про стан залишкових напружень після зварювання. Найбільші залишкові напруження (ЗН) в поєднанні із високою схильністю до руйнування мають зони термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань. Як розрахункове, так і експериментальне визначення ЗН в цих ділянках є ускладненим. **Мета.** Метою публікації є підбір, адаптація та подальше вдосконалення методики визначення ЗН для аналізу ЗТВ зварних з'єднань вантажопідійомних кранів. **Методика.** Для аналізу ЗТВ зварних з'єднань було обрано експериментальну методику свердлення глухого отвору. Використовується високошвидкісне покрокове свердлення отворів сверлами зворотної конусності. Результуючий відгук деформації поверхні ресструється трьохелементною тензорозеткою. Для вдосконалення розрахункового етапу експериментальної методики визначення ЗН поряд із експериментами проводилося кінцево-елементне моделювання в тривимірній постановці. Методом кінцевих елементів відтворювалася техніка експерименту, розглядався вплив ряду граничних умов на відхилення у розрахунках. **Результати.** Проаналізовано вплив близькості валика шва на похибки експерименту. Для різного співвідношення діаметру отвору і діаметру тензорозетки розглянуто похибки від усереднення результатів деформацій на базі тензорешітки. Для конструкційної низьковуглецевої сталі представлено залежності відхилень результатів експериментів від рівня ЗН. **Наукова новизна.** Вдосконалено методику експериментального визначення ЗН свердленням глухого отвору. Зокрема, представлено рекомендації до проведення кількісних вимірювань високих ЗН (близьких до межі текучості) цим методом. Отримано поправні коефіцієнти для врахування усереднення деформацій на базі тензорешітки при тензометруванні контуру отвору. **Практична значимість.** Результати дослідження розширюють можливості методики визначення ЗН свердленням глухого отвору в контексті дослідження ЗТВ зварних з'єднань з конструкційних низьковуглецевих сталей. Базуючись на отриманих результатах вдалося на 5...20 % підвищити точність визначення ЗН в безпосередній близькості до валику кутового зварного шва. Проведення вимірювань в найбільш проблемних зонах зварних металевих конструкцій вантажопідійомних кранів дозволить знайти шляхи оптимізації технології їх виробництва.

**Ключові слова:** залишкові напруження, зварювання, зона термічного впливу, метод глухого отвору, тензометрування, метод кінцевих елементів.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТОДОМ СВЕРЛЕНИЯ ГЛУХОГО ОТВЕРСТИЯ

ЛЯТУРИНСКИЙ В. А. <sup>1\*</sup>,  
СИДОРЕНКО М. В. <sup>2</sup>, *к.т.н.*

<sup>1\*</sup> Кафедра деталей машин и подъёмно-транспортных механизмов, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (0689) 79-58-04, e-mail: [vasilyliat@gmail.com](mailto:vasilyliat@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7487-0696

<sup>2</sup> Кафедра деталей машин и подъёмно-транспортных механизмов, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, ORCID ID: 0000-0002-9097-9739

**Аннотация.** В современном производстве сварных конструкций грузоподъемных кранов необходима объективная информация о состоянии остаточных напряжений после сварки. Наибольшие остаточные напряжения (ОН) в сочетании с высокой склонностью к разрушению имеют зоны термического влияния (ЗТВ) сварных соединений. Как расчетное, так и экспериментальное определение ОН в этих участках затруднено. **Цель.** Целью публикации является подбор, адаптация и дальнейшее совершенствование методики определения ОН для анализа ЗТВ сварных соединений грузоподъемных кранов. **Методика.** Для анализа ЗТВ сварных соединений была выбрана экспериментальная методика сверления глухого отверстия. Используется высокоскоростное пошаговое сверление отверстий сверлами обратной конусности. Результирующий отклик деформаций поверхности регистрируется трехэлементной тензорозеткой. Для совершенствования расчетного этапа экспериментальной методики определения ОН наряду с экспериментами проводилось конечно-элементное моделирование в трехмерной постановке. Методом конечных элементов воспроизводилась техника эксперимента, рассматривалось влияние ряда граничных условий на отклонения в расчетах. **Результаты.** Проанализировано влияние близости валика шва погрешности эксперимента. Для различного соотношения диаметра отверстия и диаметра тензорозетки рассмотрены

погрешности от усреднения результатов деформаций на базе тензорешетки. Для конструкционной низкоуглеродистой стали представлены зависимости отклонений результатов экспериментов от уровня ОН. **Научная новизна.** Усовершенствована методика экспериментального определения ОН сверлением глухого отверстия. В частности, представлены рекомендации к проведению количественных измерений высоких ОН (близких к пределу текучести) этим методом. Получены поправочные коэффициенты для учета усреднения деформаций на базе тензорешетки при тензометрировании контура отверстия. **Практическая значимость.** Результаты исследования расширяют возможности методики определения ОН сверлением глухого отверстия в контексте исследования ЗТВ сварных соединений из конструкционных низкоуглеродистых сталей. Основываясь на полученных результатах удалось на 5...20 % повысить точность определения ОН в непосредственной близости к валику углового сварного шва. Проведение измерений в наиболее проблемных зонах сварных металлических конструкций грузоподъемных кранов позволит найти пути оптимизации технологии их производства.

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, сварка, зона термического влияния, метод глухого отверстия, тензометрирование, метод конечных элементов

## STUDY OF RESIDUAL STRESSES IN WELDED JOINTS USING THE BLIND HOLE DRILLING METHOD

LYATURINSKY V. O.<sup>1\*</sup>,  
SIDORENKO M. V.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.)*

<sup>1\*</sup> Department of machine parts and lifting and transport mechanisms, Zaporizhzhya National Technical University, 64, Zhukovskogo str., Zaporozhye 69063, Ukraine, tel. +38 (0689) 79-58-04, e-mail: [vasilyliat@gmail.com](mailto:vasilyliat@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7487-0696

<sup>2</sup> Department of machine parts and lifting and transport mechanisms, Zaporizhzhya National Technical University, 64, Zhukovskogo str., Zaporozhye 69063, Ukraine, ORCID ID: 0000-0002-9097-9739

**Abstract.** In today's production of cranes' welded structures objective information about the state of residual stresses after welding is needed. The greatest residual stresses (RS) in combination with a high propensity to ruin have heat-affected zones (HAZ) of welded joints. The calculated as well as experimental determination of RS in these areas is difficult. **Purpose.** The purpose of this article is selection, adaptation and further improvement of the methodology for RS determining in the HAZ of crane welded joints. **Methodology.** To analyze the HAZ of welded joints the experimental method of drilling blind holes was chosen. A high-speed multiple-step drilling with inverted-cone drills is used. The resulting response of surface deformation is captured by three-element strain gauge rosette. To improve the calculation stage of the experimental method for determining RS a finite element simulation in three-dimensional formulation was performed along with experiments. The technique of the experiment was simulated by finite element method; the influence of a number of boundary conditions on the calculations' deviations was examined. **Findings.** The influence of the proximity of the weld bead on the error of the experiment has been analyzed. For different ratios of hole diameter to the diameter of the strain gauge rosette the errors from averaging deformation results on the basis of gauge were investigated. For low-carbon structural steel the abnormalities of the experimental results depending on the level of RS were presented. **Originality.** Methodology of RS experimental determination by the blind hole drilling method was improved. In particular, recommendations for the quantitative measurement of high RS (close to the yield point) by this method were introduced. Correctional coefficients for accounting the averaging deformation on the basis of the gauge in hole's contour strain measurements were presented. **Practical value.** The obtained results extend the possibilities of the blind hole drilling methodology in the context of HAZ RS research on welded joints made from low-carbon structural steels. Based on the obtained results the 5...20 % increase of accuracy of the RS definition in the immediate vicinity of the fillet weld was achieved. Performing the RS measurements in the most problematic areas of welded metal structures will allow one to find ways to optimize the cranes' steel structures production technology.

**Keywords:** residual stress, welding, heat affected zone, the blind hole method, strain measurements, finite element method

### Вступ

Залишкові напруження (ЗН) при зварюванні є важливою науково-технічною проблемою [1]. В зонах термічного впливу (ЗТВ) зварного з'єднання зазвичай спостерігається початок руйнування динамічно навантаженої металоконструкції (МК) [2]. Руйнування може початися через те, що номінальні робочі напруження ділянки складаються з залишковими зварними напруженнями і в сумі перевищують межу текучості або межу витривалості матеріалу. В умовах недостатньої пластичності навколошовної зони, несприятливої структури, додаткових концентраторів напружень, тощо, під

навантаженням з'являється мікротріщина, яка росте та знижує довговічність вузла. Для кранових МК відповідно до [3]: «...необхідність і методи термічної обробки зварних з'єднань несучих елементів металоконструкцій установлюються технічними умовами на виготовлення, ...». Розробка раціональних технічних умов по обробці зварних з'єднань неможлива без інформації про значення ЗН, викликаних зварюванням.

Розрахункові методи визначення залишкових зварних напружень дуже складні, тому на перший план виходять експериментальні методики. Необхідна достатньо дешева, універсальна та достовірна методика заміру залишкових напружень в ЗТВ зварних з'єднань МК.

### Мета

Метою публікації є обґрунтування, адаптація та вдосконалення методики вимірювання ЗН в контексті її застосування в ЗТВ зварних з'єднань кранових металевих конструкцій.

### Аналіз досліджень та обґрунтування експериментальної методики

Сьогодні використовуються як фізичні (магнітні, акустичні, рентгенівські, вихрострумові) так і механічні (відокремлення, зняття шару, канавки, отвору) методи виміру залишкових напружень в металах [12]. Причому останні мають вищу достовірність, оперативність, точність та часто більш прості в реалізації. Головним недоліком механічних методів є необхідність часткового або повного руйнування зразку. Більш перспективними є магнітні та електричні методи, але для їх тарування бажано використовувати достовірний фізичний метод.

ЗТВ зварного з'єднання є найбільш цікавою з точки зору ЗН МК, але вона має складну нестабільну анізотропну структуру, що накладає додаткові вимоги до експериментальної методики. Виділити фактор ЗН з показів неруйнівних методів тут дуже складно, достовірність таких результатів не висока. В ЗТВ наявні високі градієнти ЗН поблизу зварного шву, тому усереднення результатів, притаманне багатьом руйнівним методам тут неприйнятне. Необхідне мінімальне руйнування конструкції під час експерименту для можливості її подальшої експлуатації. Необхідна можливість проведення великої кількості вимірювань на одній конструкції/зразку.

Сумуючи зазначені вимоги найбільш прийнятною бачиться методика свердлення глухого отвору [5, 7, 11]. Вона малоруйнівна, оперативна, достовірна. Методика отвору з тензометруванням поверхневих деформацій відповідає стандарту США E-837-08 [5].

### Методика експерименту

Суть методики полягає в тому, що ЗН в зразку після видалення циліндричного об'єму металу (свердління отвору) спричиняють деформації поверхні металу навколо отвору. Їх фіксація та рішення задачі Кірша дозволяє знайти значення усереднених в об'ємі отвору ЗН зразку. За [5] переміщення в цьому методі фіксуються спеціальною трьохелементною тензорозеткою.

Окрім [5] існує ще 2 поширених методики розрахунку ЗН за результатами тензометрування контуру отвору: інтегральний метод Шаєра [13], метод Кокельманну [14].

Всі методи мають можливість для визначення неоднорідних за товщиною зразка ЗН. Але кожен потребує індивідуальних коефіцієнтів, які враховують геометричні фактори експерименту.

Для проведення експериментів, на базі системи SINT [9], авторами була зібрана експериментальна установка (рис. 1).

В експерименті використовуються височастотні режими свердлення (300000 об/хв), що згідно [7, 10] дозволяє знехтувати впливом процесу свердління на результати тензометрування.

Для спрощення математичної обробки результатів експерименту необхідно отримувати отвір циліндричної форми, тому використовуються свердла зворотної конусності (рис. 2).

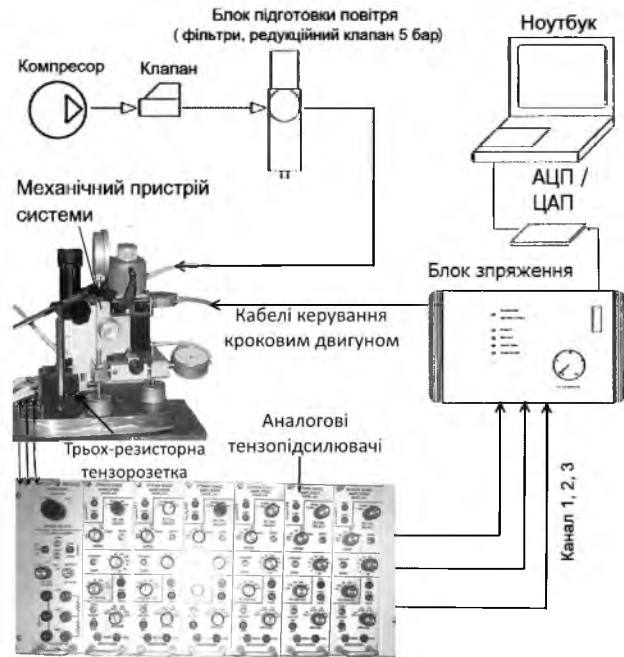


Рис. 1. Схема системи вимірювання ЗН / Residual stresses measurement system scheme



Рис. 2. Свердла зворотної конусності: а) Карбід-вольфрамові; б) Алмазні / Inverted-cone drills: a) tungsten-carbide; b) diamond

Використовуються трикомпонентні тензорозетки (рис. 3) та спеціалізовані аналогові тензопідсилювачі.

Для можливості аналізу змін ЗН по товщині отвір необхідно виконувати в декілька кроків (40 за [5]). Для забезпечення високої точності подачі в механічному пристрої системи використовується кроковий двигун та мікрометрична гвинтова передача.

Послідовність проведення експерименту достатньо детально описана в [5, 9, 12 та інш.].

Для можливості тарування методики та експериментальної перевірки отриманих результатів, що приведені далі, було спроектовано та виготовлено тарувальну тензобалку (рис. 4). З її використанням на відпущених зразках створювалося одновісне поле ЗН.

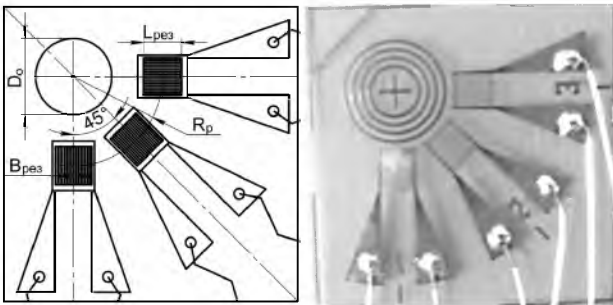


Рис. 3. Трьох-резисторна тензорешітка / Three-resistors strain gauge rosette

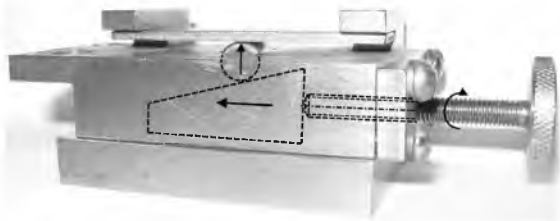


Рис. 4. Тарувальна тензобалка / A calibration beam

**Методика моделювання**

Для вдосконалення розрахункового етапу експериментальної методики визначення ЗН поряд із експериментами проводилося кінцево-елементне (КЕ) моделювання в тривимірній постановці. Розглядалася пружно-пластична поведінка матеріалу із використанням кривої дилатометричного тесту Сталі 20. Методом кінцевих елементів (МКЕ) відтворювалася техніка експерименту. Створювалися тривимірні моделі, для яких задавався певний напружено-деформований стан. На поверхню накладалася реальна геометрія тензорешітки. Процес свердлення імітувався зміною механічних властивостей КЕ, що формують отвір. Знімалися покази викликаних свердленням деформацій кожного витка тензорешітки. За результатами деформацій проводився розрахунок ЗН за методикою [5].

**Результати дослідження**

Було проведено ряд моделювань, та лабораторних експериментів, що дозволило проаналізувати:

- Усереднення результатів деформацій на базі тензорешітки при різних діаметрах отвору;
- Вплив близькості розташування валику зварного шва на результати тензометрування;
- Вплив рівня ЗН на похибку розрахунку за методикою [5].

Детально розглянемо результати за кожним пунктом.

1) Вплив геометрії тензорешітки.

Тензорешітки використовуваних тензорозеток мають форму квадрату зі стороною 1 мм, діаметр розташування резисторів  $D_{роз} = 4,66$  мм (рис. 5). Розглядалися деформації витків решітки трьох резисторів при свердленні в зразку із одновісними ЗН отворів діаметрами 1,6; 2,0; 2,5 мм. Представлено похибку визначення деформацій і ЗН через

усереднення переміщень по всім виткам резистора (в розрахунках вважається що деформація  $\epsilon$  відповідає центральному витку). В табл. 1 представлено результати цього етапу досліджень. 1-й резистор відповідає орієнтації 1-го головного напруження, 2-й та 3-й відповідно зорієнтовані під кутом  $45^\circ$  та  $90^\circ$  до першого. Всі зазначені відхилення викликають зниження розрахованого рівня ЗН.

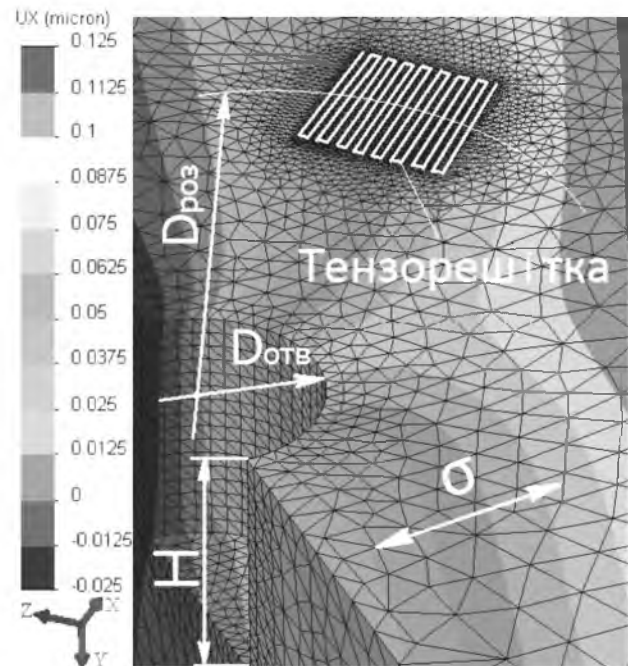


Рис. 5. Переміщення КЕ моделі тензорешітки / Displacements of strain gauge rosette finite-element model

Таблиця 1

**Ефект усереднення деформацій на базі тензорезистору при свердленні отвору / The effect of averaging strains on the strain gauge base when drilling holes**

Похибки розрахунків через усереднення переміщень на базі резисторів	Резистор	$D_{отв}$ , мм		
		1,6	2	2,5
Визначення деформацій, $\Delta\epsilon / \epsilon$ , %	1	8,0	7,7	7,2
	2	4,3	4,1	4,0
	3	14,3	13,8	13,0
Розрахунок 1-го головного напруження, $\Delta\sigma_1 / \sigma_1$ , %		6,6	6,4	6,0
Розрахунок 2-го головного напруження, $\Delta\sigma_2 / \sigma_1$ , %		2,3	2,2	1,8

Як видно із табл. 1, похибка від усереднення результуючих переміщень по ширині решітки є суттєвою і вона мало залежить від співвідношення  $D_{отв}/D_{роз}$  в їх найбільш поширеному діапазоні.

Одним із рішень проблеми може стати вказання дещо завищеного радіуса тензорозтетки при розрахунку. Але рекомендується використання КЕ моделювання для кожного окремого випадку вимірювань. Встановлено, що для внесення поправок із цільовою похибкою 2...2,5 %, кожену решітку

тензорозетки достатньо розглянути МКЕ у вигляді 3-х відрізків (6-ти точок) крайніх та центрального витків.

2) Розташування валику шва.

Дослідження [11 та інш.] проводилися з метою визначення геометричних обмежень, що накладаються на зразки/деталі при використанні методу глухого отвору. Згідно [5], із використанням нашого типу тензорозеток, відстань від центру отвору до перешкоди повинна складати не менш  $0,5D_{роз}$  (тензорезистори розташовуються діаметрально протилежно перешкоді); мінімальна відстань до краю деталі за рекомендаціями [11] складає  $5D_{отв}$ , за [5] –  $1,5D_{роз}$ . Близькість валика кутового шву до точки вимірювань в літературі окремо не розглядалася.

МКЕ проводилося моделювання деформацій при ЗН стані типовому для зварних з'єднань (розтяг вздовж шву, стиск – уперек [1, 2]). Встановлено, що з використанням наявних тензорозеток рис. 3, отвір можна виконувати на мінімальній відстані  $\Delta_{кр} = 1,2$  мм (рис. 6), при умові що  $B_{реш} < 2R_{отв}$  (рис. 6). Доведено, що навіть виконання отвору впритул ( $\Delta_{кр} = 0$ ) призведе до похибки показів найближчої до шва решітки (показано на рис. 6) в межах 5%. На покази інших решіток тензорозетки близькість валика не впливає.

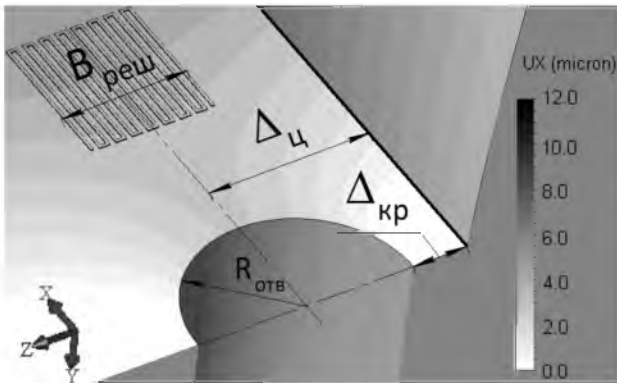


Рис. 6. Переміщення тензорешітки поблизу шва / Displacements of strain gauge rosette close to the weld

3) Наявність пластичних деформацій навколо контуру отвору

Найсерйознішим недоліком методу свердлення отвору, з позиції аналізу ЗН зварних з'єднань, є зниження його точності при появі пластичної деформації контуру отвору. Відомо, що для глухого отвору з  $H = D_{отв}$  (рис. 5) при ЗН, що перевищують  $\sigma_t/3$  на контурі отвору вже з'являються пластичні деформації [4]. Відповідно до [5] результати експерименту можна вважати чисельно вірними якщо розрахункові ЗН не перевищують 60 % від межі текучості  $\sigma_t$  матеріалу. Але кількісна оцінка можливої похибки не представлена.

Моделювалося свердлення отвору із  $D_{отв} = 2$  мм в зразку із одновісними ЗН, що поступово наближалися  $\sigma_t$  (рис. 7, 8). Пластична поведінка матеріалу описувалася експериментально

визначеною кривою дилатометричного тесту сталі 20. Використовувався критерій пластичності Мізеса.

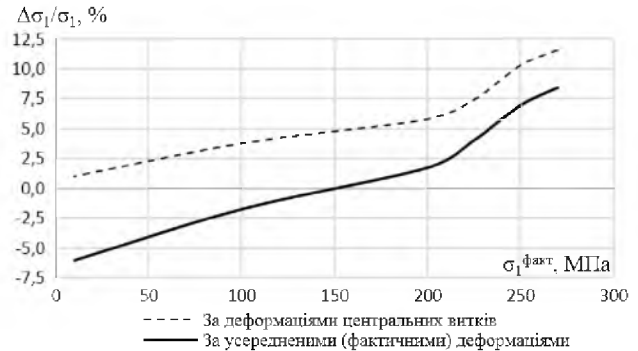


Рис. 7. Залежність похибки визначення 1-го головного напруження  $\sigma_1$  від його рівня / The error in evaluation of the first principal stress  $\sigma_1$  depending on its value

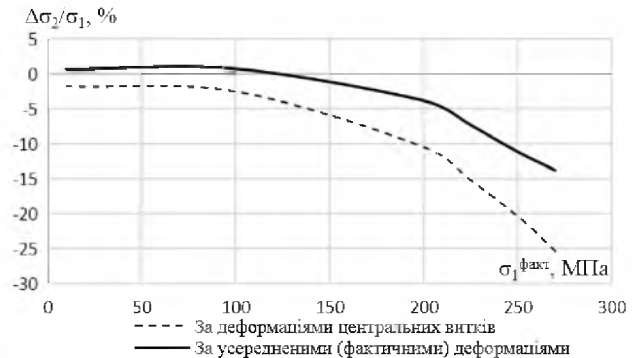


Рис. 8. Залежність фіктивного розрахованого 2-го головного напруження  $\sigma_2$  від рівня  $\sigma_1$  / The fictitious calculated 2nd principal stress  $\sigma_2$  depending on the value of the first principal stress  $\sigma_1$

Було виявлено значну нерівномірність розподілу ЗН в витках тензорешіток наближених до ділянок пластичного деформування, в цих резисторах  $\Delta\epsilon/\epsilon$  (див. табл. 1) досягає 25 % (резистор, перпендикулярний до орієнтації  $\sigma_1$ ).

Встановлено що використання припущень пружного деформування в наявних методиках розрахунку ЗН призводить до суттєвої похибки (> 5 %) в розрахунку деформацій і ЗН за [5] лише при  $\sigma_{max} > 0,8\sigma_t$  (рис. 7, 8).

Проведений на тензобалочці (рис. 4) ряд експериментів підтвердив коректність висновків кінцево-елементних розрахунків що стосуються усереднення деформацій на базі резистору, а також щодо аналізу високих ЗН.

Висновки

1. В статті обґрунтовано експериментальну методику для визначення ЗН в зварних з'єднаннях.
2. Доведено необхідність врахування ширини тензорешітки та рекомендовано поправки на неточності виміру деформацій.

3. Доведено можливість проводити коректні експерименти по всій ЗТВ, не зважаючи на близькість валика шву до отвору.

4. Показано вплив рівня ЗН на точність їх визначення за методикою [5].

5. Використання отриманих результатів дозволило підвищити точність експериментального визначення ЗН в ЗТВ на 5...20 %.

Проведення вимірювань в найбільш проблемних зонах зварних конструкцій дозволить знайти шляхи оптимізації технології виробництва кранових МК.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Вершинский А.В. Технологичность и несущая способность крановых металлоконструкций / А.В. Вершинский. – М.: Машиностроение, 1984. – 167 с.

Vershinskiy A.V. Tehnologichnost i nesuschaya sposobnost kranoviyh metallokonstruksiy [Manufacturability and carrying capacity of crane metal structures]. Moscow, Mashinostroeni., 1984. 167 p.

[http://books.zntu.edu.ua/book\\_info.pl?id=72291](http://books.zntu.edu.ua/book_info.pl?id=72291).

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

Lyaturinsky V.A., Sidorenko M.V. Modelirovanie poslesvarochnogo napryazhonno-deformirovannogo sostoyaniya korobchatyih kranoviyh balok s krivolinyeynymi shvami [Simulation of post-weld stress-strain state of box crane girders with curved seams]. Novi materiali i tehnologiyi v metalurgiyi ta mashinobuduvanny [Innovative materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering], 2013, no. 2, PP. 130-138.

[http://journal.zntu.edu.ua/nmt/files/NMT22013/NMT\(2\)\\_2013.pdf](http://journal.zntu.edu.ua/nmt/files/NMT22013/NMT(2)_2013.pdf).

3. НПАОП 0.00-1.01-07. Правила будови і безпечної експлуатації вантажопідіймальних кранів. – Харків: Індустрія, 2008. – 368 с.

NPAOP 0.00-1.01-07. Pravila budovi i bezpechnoyi ekspluatatsiyi vantazhopidymalnih kraniv [Rules of construction and safe operation of cranes]. Kharkov, Industry., 2008. 368 p.

<http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z0784-07/page>.

4. Чернышев Г.Н. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах / Г.Н. Чернышев, А.Л. Попов, В.М. Козинцев, И.И. Пономарев. – М.: Наука. Физматлит, 1996. – 240 с.

Chernyishev G.N., Popov A.L., Kozintsev V.M., Ponomarev I.I. Ostatochnyye napryazheniya v deformiruemyyih tverdyih telah [Residual stresses in deformable solids]. Moscow, Nauka., 1996. 240 p.

[http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o\\_17891](http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_17891).

5. ASTM E837-08. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the HoleDrilling Strain-Gage Method. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.

6. Beghini M. An account of plasticity in the hole-drilling method of residual stress measurement / M. Beghini, L. Bertini, P. Raffaelli // Journal of strain analysis, Vol 30, No. 3, 1995. [http://www.researchgate.net/publication/239407780\\_An\\_account\\_of\\_plasticity\\_in\\_the\\_hole-drilling\\_method\\_of\\_residual\\_stress\\_measurement](http://www.researchgate.net/publication/239407780_An_account_of_plasticity_in_the_hole-drilling_method_of_residual_stress_measurement).

7. Flaman M.T. Brief investigation of induced drilling stresses in the center-hole method of residual-stress measurement / M.T. Flaman // Experimental Mechanics, January 1982, PP. 26-30.

<http://link.springer.com/article/10.1007/BF02325700>.

8. Mahmoudia A.H., Trumanb C.E., Smithb D.J., PavierM.J. The effect of plasticity on the ability of the deep hole drilling technique to measure axisymmetric residual stress // International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 53, Issue 11, November 2011, PP. 978-988.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002074031101676>.

9. MTS3000 – Restan. Automatic System for Residual Stress Measurement by Hole-Drilling. - SINT Technology s.r.l., 2014. 8 p.

[http://www.sintechnology.com/strain-gauge\\_measurements/RESTAN\\_MTS3000.html](http://www.sintechnology.com/strain-gauge_measurements/RESTAN_MTS3000.html).

10. Nau A., Scholtes B. Evaluation of the High-Speed Drilling Technique for the Incremental Hole-Drilling Method / Experimental Mechanics, 2012, Vol. 53, PP. 531-542.

<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11340-012-9641-1>.

11. Preckel U. Erweiterung der Verfahrensgrenzen beim Bohrlochverfahren zur Ermittlung von Eigenspannungen // Industrie Anzeiger, Kurzberichte der Hochschulgruppe Fertigungstechnik 108, Nr. 8, 1986, PP. 18-26.

12. Schajer G.S. Relaxation Methods for Measuring Residual Stresses: Techniques and Opportunities // Experimental Mechanics, No 10, 2010; pp. 1117-1127.

<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11340-010-9386-7>.

13. Schajer G. Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling Method. Part I, II / G. Schajer // Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. no. 110, 1988, p. 338-349.

<http://materialstechnology.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1424124>.

14. 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 // MTB 29, 1993, Vol. 2, p. 33-38.

*Стаття рекомендована до публікації д-ром. техн. наук, проф. О. Я. Качаном (Україна); д-ром. техн. наук, проф. О. В. Овчиніковим (Україна)*

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 24.03.2015