

УДК 621.791.052

А. Лукашевич, аспірант

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України,
Київ, Україна

ВИЯВЛЕННЯ ВТОМНИХ ТРІЩИН В ЕЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦІЙ, ВИГОТОВЛЕНИХ З МАЛОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

Резюме. Предложено тензометрический метод обнаружения усталостных трещин около сварных швов рам тележек железнодорожных локомотивов путем расчета относительного рассеяния энергии в конструкционном материале, вычисления методом конечных элементов разности деформаций элемента конструкции рамы тележки на контролируемых участках его поверхности.

Ключевые слова: тензометрический метод обнаружения трещин, сварные швы, относительное рассеяние энергии, разница деформаций, метод конечных элементов, рама тележки электровоза ДС3.

A. Lukashevych

DETECTION OF FATIGUE CRACKS IN STRUCTURAL ELEMENTS MADE OF MILD STEEL

The summary. Proposed strain gauge method to detect fatigue cracks near welds bogie frames of railway locomotives by calculating the relative energy dissipation in structural materials, finite element method calculation of the difference between the deformations of the element out construction of a bogie frame in controlled areas of its surface.

Key words: strain gauge method for detecting cracks, welded seams, the relative energy dissipation, strain difference, finite element method, an electric trolley frame DS 3.

Вступ. Під час експлуатації залізничних локомотивів необхідно контролювати виникнення тріщин у важкодоступних для візуального огляду місцях їх рам візків, рам кузовів, несучих кузовів. Зокрема виникають тріщини у важкодоступних для візуального контролю місцях в електровозах ЧС7[1], ДС3. В електровозі ДС3 локомотивного депо станції Київ-пасажирський ДТГО “Південно-Західна залізниця” через непровар у зварному шві приварки накладки кріплення кронштейна буксового гасника коливача, виготовленої зі сталі 20Л ГОСТ 1977-88, до боковини рами візка, виготовленої зі сталі 09Г2С ГОСТ 19903-74, виникла втомна тріщина на 10 годину 45 хвилин стрілки годинника. Ремонт рами візка передбачав визначення необхідного запасу міцності вищезгаданого елемента конструкції, розроблення технології його ремонту та інструментальний контроль можливого повторного зародження й початкового росту тріщини з контролем та аналізом результатів вимірювань за допомогою створеної нами комп’ютерної програми.

Розрахунки запасу міцності зварного шва передбачали використання результатів вимірювань, що виникають в них механічних напружень під час проведення ходових динаміко-міцнісних випробувань рами візка. Ходові динаміко-міцнісні випробування здійснено за допомогою бортового вимірювального комплексу БВК-6 [2].

Ми створили технологію заварювання цієї тріщини, яка передбачала: встановлення за допомогою ультразвукового дефектоскопа місць розташування вершин, глибини наскрізної тріщини; засвердлування вершин тріщини; вирізування тріщини; підготовку кромки вирізу під багатопланове наплавлення металу; наплавлення металу; охолодження завареної тріщини за умови виникнення мінімальних залишкових термічних напружень; оптимальне зміцнення відремонтованого зварного шва шляхом

механічної проковки біляшовної зони конструкційного матеріалу за критерієм глибини утвореного при цьому рівчачка [3] та інструментальний контроль можливої повторної появи тріщини за допомогою приладу АВК-Т2 [4] з комп'ютерним аналізом результатів вимірювань.

У статті описано використання створеного тензометричного нуль-індикаторного методу [4, 5] контролю можливої повторної появи тріщини у вищезгаданому елементі конструкції. Необхідність створення цього методу зумовлена відсутністю можливості перевірки правильності прийнятих рішень щодо ремонту елемента конструкції рами візка шляхом її випробувань на стенді.

В роботі [5] показано, що чутливість нуль-індикаторного методу збільшується у випадку контролю зварних швів, зміцнених механічною проковкою. Актуальним питанням є пошук шляхів збільшення чутливості методу виявлення тріщин біля зварних швів, у яких відсутні значні залишкові напруження різноманітної природи. Вимірювання величини енергії, яка розсіюється при зародженні та рості втомної тріщини, збільшує чутливість цього методу [1]. Однак при цьому необхідно вимірювати одночасно як амплітуди деформацій на границях підконтрольної ділянки поверхні зразка чи елемента конструкції, так і амплітуду напружень, що виникають на цій ділянці. Це є недоліком вищезгаданого методу виявлення тріщин.

Можливо здійснювати вимірювання відносного розсіювання енергії в конструкційному матеріалі чи елементі конструкції, яке не має цього недоліку [6]. Випробовувались зразки корсетного типу товщиною 3 мм зі сталі ВСт.3 сп. ГОСТ14637-89 з концентратором напружень у вигляді отвору діаметром 1 мм, розташованого на середині робочої частини зразка. Зразки випробувані на установці "Шенк" на консольний згин при жорсткій схемі навантаження. Контроль моментів зародження та початкового росту тріщин втомних у зразках здійснювався за допомогою двох тензорезисторів КФ5 з базою 1 мм, наклеєних на робочі поверхні зразків біля їх бокових поверхонь. Вимірювання деформацій тензорезисторів здійснювалось приладами БВК-6 та АВК –Т2 [5]. Один із тензорезисторів вимірював деформацію поверхні зразка безпосередньо біля місця виникнення та початкового росту тріщини. Зсув фази φ_1 періодичної зміни значення амплітуди деформації поверхні зразка, вимірний цим тензорезистором відносно тензорезистора динамометра, зумовлений розсіюванням енергії в матеріалі зразка, його закріпленням у захватах установки та зародженням і ростом тріщини. При цьому другий тензорезистор вимірював деформацію поверхні зразка, на яку не впливало виникнення та ріст втомної тріщини. Зсув фази φ_2 періодичної зміни значення амплітуди цієї деформації відносно тензорезистора динамометра зумовлений лише розсіюванням енергії в конструкційному матеріалі та в захватах кріплення зразка. Тому різниця $\Delta\psi$ величин ψ_1 та ψ_2 дорівнює відносній енергії виникнення та росту тріщини. $\Delta\psi$ розраховано за формулою [6]:

$$\Delta\psi = \psi_1 - \psi_2 = 2\pi (\sin\varphi_1 - \sin\varphi_2), \quad (1)$$

де 2π – постійний коефіцієнт. Цей фазовий метод не потребує вимірювання амплітуд зусиль, що діють на елемент конструкції, яка спрощує процедуру виявлення тріщини втомних.

На рис. 1 наведено результати досліджень фазовим методом виникнення та росту тріщини у зразку з концентратором у вигляді отвору діаметром 1 мм, розташованого на його середині. Амплітуда номінальних напружень становила 167 МПа. Зміна величини $\Delta\psi$ спостерігається до виникнення тріщини на поверхні зразка.

Очевидно, що фазовий метод дозволяє реєструвати не лише ріст втомних тріщин у конструкційних матеріалах, а також їх зародження.

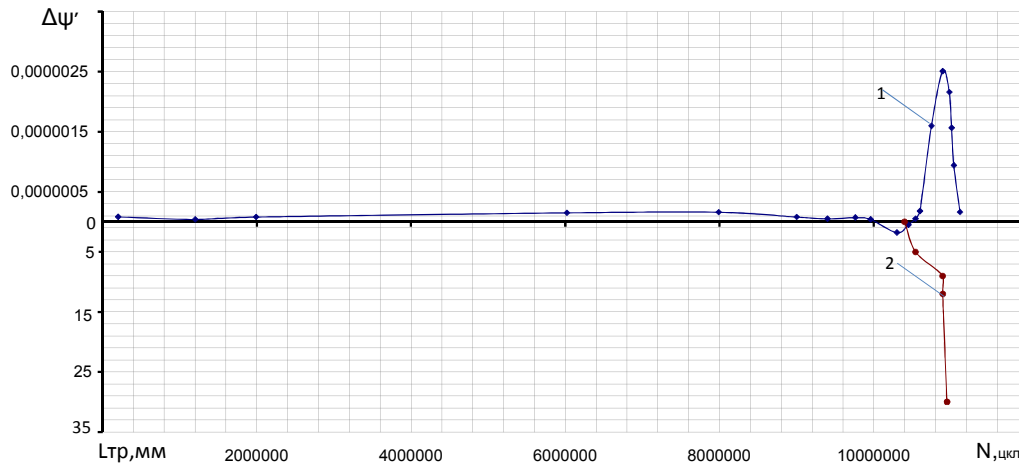


Рисунок 1. Залежність першої похідної відносної енергії $\Delta\psi$ від числа циклів навантаження N (графік 1) відповідно до розміру тріщини L_{tr} (мм) від числа циклів навантаження (графік 2)

Моделювання виявлення тріщини у рамі візка електровоза ДСЗ методом скінченних елементів. Відсутність стенда для випробовувань рам візків в умовах, близьких до умов їх експлуатації, на якому можливо перевірити правильність прийнятих рішень щодо їх ремонту, змусила нас створити комп'ютерну модель напружено-деформованого стану боковини рами візка з привареною накладкою та тріщинами різної довжини. Так можливо передбачити показання приладу АВК-Т2 при гіпотетичній появі втомної тріщини в рамі візка. Проведення ходових динаміко-міцнісних випробувань елементів конструкції рами візка дозволяє експериментально виміряти напружено-деформований стан їх окремих точок поверхні, що, в свою чергу, може служити критерієм достовірності створеної комп'ютерної моделі. Достовірність комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану боковини рами з тріщиною різної довжини перевіряли шляхом порівняння значень амплітуд механічних деформацій та напружень, що виникають на поверхні зразка, розрахованих методом скінченних елементів [7] та виміряних за допомогою приладів БВК-6, АВК-Т2 описаним в [5] методом.

Тріщина моделювалась чверть еліптичним розрізом шириною 20 мкм. Половина довшої осі еліпса дорівнювала довжині тріщини на поверхні зразка.

Прийнято допущення, що розподіл напружень у вершині тріщини не впливає на напружено-деформований стан зразка в місцях встановлення тезорезисторів. У розрахунках використана модель пружного ізотропного тіла з пружними константами сталі Ст3 сп. ГОСТ 14637-89: $E=2,0935 \times 10^5$ МПа, $\mu=0,3$. E -модуль Юнга, μ -коефіцієнт Пуассона. Модуль Юнга E визначено шляхом механічних випробувань [8] відповідних зразків на установці "Instron", виготовлених із заготовок для корсетних зразків.

Кресленики зразків, елемента конструкції рами візка, кінематичної схеми установки "Шенк" здійснені за допомогою програми Pro/ Engineer [9]. Для розрахунків їх напружено-деформованого стану використовувався модуль ANSYS WORKBENCH[10]. При розрахунках моделі використовувалась сітка типу "curvature" розмірами лицевої сторони тетрайдера 1 мм і мінімальними розмірами тетрайдера 0,005мм. Розрахунки здійснені за допомогою комп'ютера на базі процесора Intel I-5, з частотою 2,6 ГГц, оперативною пам'яттю 8 Гб. Розрахунок тривав 1 год 30 хвилин. Моделі розраховувалися з використанням 30000000 скінченних елементів.

Зразок випробувався при динамічному навантаженні. Комп'ютерні моделі побудовані для його статичного навантаження. Таке спрощення зумовлене циклічною

стабільністю механічних властивостей сталі Ст3сп ГОСТ14637-89. Втомна тріщина в моделі зразка будувалася поступово, відповідно до росту тріщини в реальному зразку.

В результаті розрахунків моделі отримували поля розподілу у зразку еквівалентних механічних напружень.

Для того, щоб імітувати наклеєні на зразок тензорезистори, в ком'ютерній моделі використовувалися константанові накладки товщиною 10 мкм. Для визначення деформацій тензорезисторів у моделі розраховувалися середні значення еквівалентних напружень у площині тензорезисторів.

Порівнювались результати розрахунку напружено-деформованого стану зразка для його спрощеного навантаження (рис. 2а) та максимально наближеного до реальних умов його випробувань (рис. 2б).

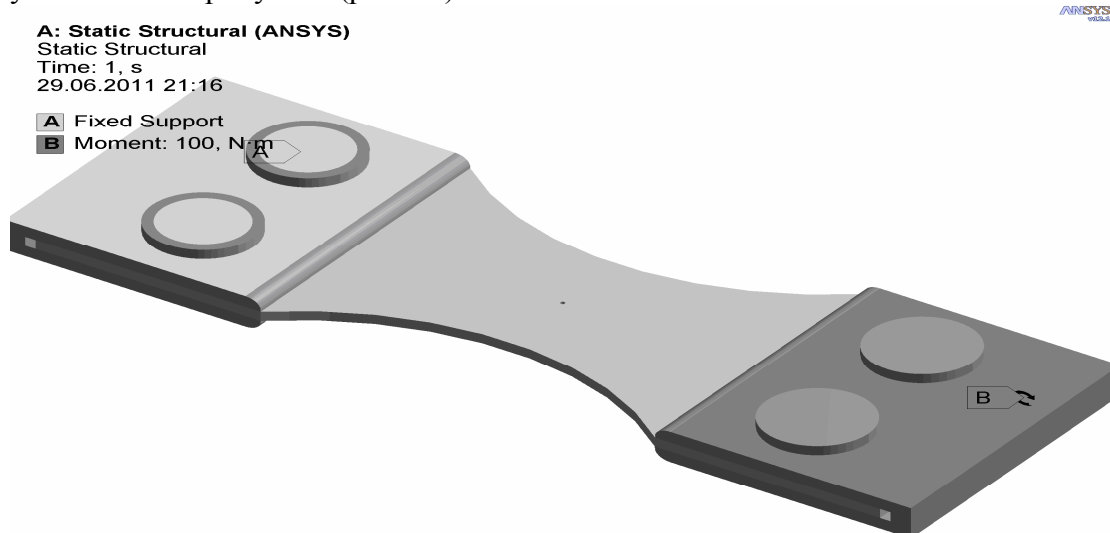


Рисунок 2а. Спрощена схема навантаження зразка

На рис. 2а А – нерухомий захват, В – рухомий захват, до якого прикладено згинаючий момент 100Нм, як показано стрілкою.

Схема навантаження зразка, яка максимально наближена до реальних умов, реалізована шляхом моделювання спрощеної схеми установки «Шенк».

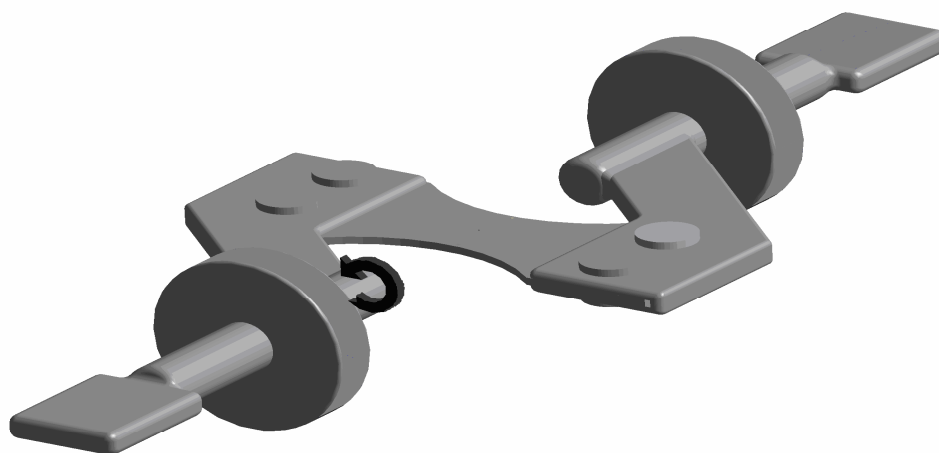
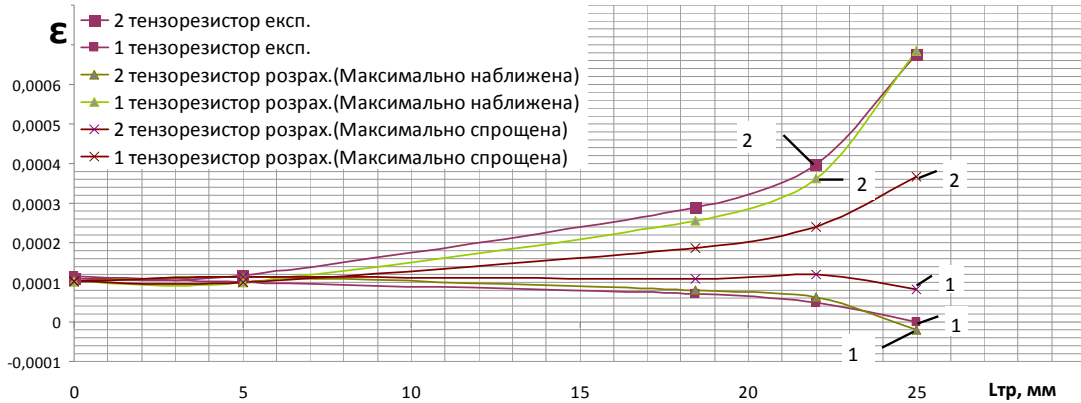


Рисунок 2б. Схема використаної установки “Шенк”

На рис. 2б корсетний зразок з концентратором посередині робочої частини деформувався рухомим захватом, як показано стрілкою.

Виявилось, що розрахунок за першою схемою навантаження дав невірні результати, бо результати розрахунків ϵ співпали з експериментально отриманими лише на 20% (рис. 3).

Рисунок 3. Залежність різниці деформацій ϵ тензорезисторів від довжини тріщини $L_{тр}$ (мм)

Результати розрахунків деформації поверхні зразка за другою схемою моделювання навантаження співпали на 95% з результатами, отриманими експериментально. Це показує, що для розрахунків напружено-деформованого стану елементів конструкцій, лабораторних зразків методом скінченних елементів необхідно використовувати моделі їх навантаження, які максимально наближені до реальних конструкцій рам візків та випробувальних установок.

Ріст тріщини у зразку суттєво впливає на його напружено-деформований стан біля концентратора напружень (рис. 4). Значення амплітуд еквівалентних напружень в Па наведено в колонці зліва у зразку без тріщини. Розподіл напружень біля концентратора з різною довжиною $L_{тр}$ наведено в правому нижньому кутку рисунка.

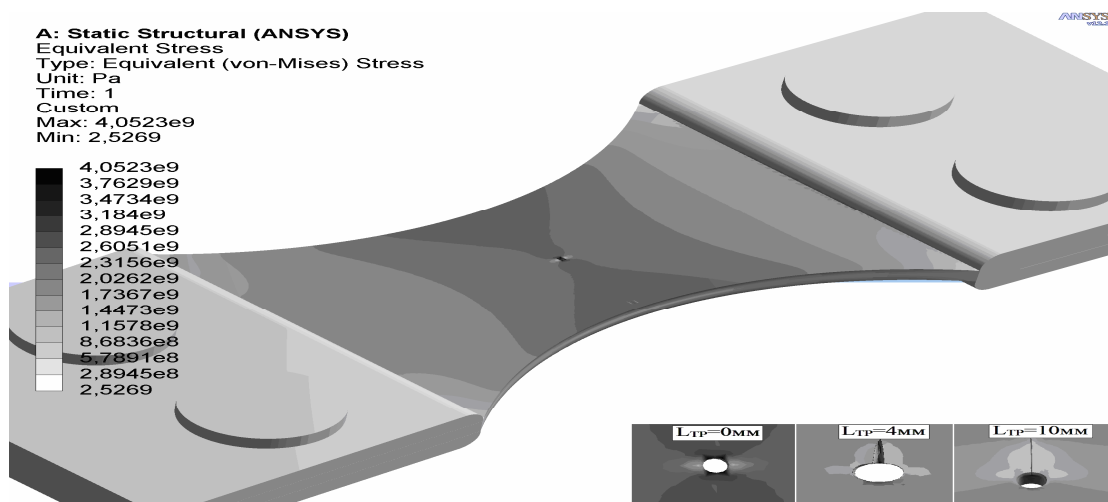


Рисунок 4. Розподіл деформацій у зразку з тріщиною різної довжини

Моделювання напружено-деформованого стану боковини рами візка з привареною накладкою здійснено за умови, що вона жорстко защемлена за місцями

встановлення подвійних ребер жорсткості (рис. 5а). Ребра жорсткості не показані на рис. 5а. \vec{P} – зусилля штока гасника коливань.

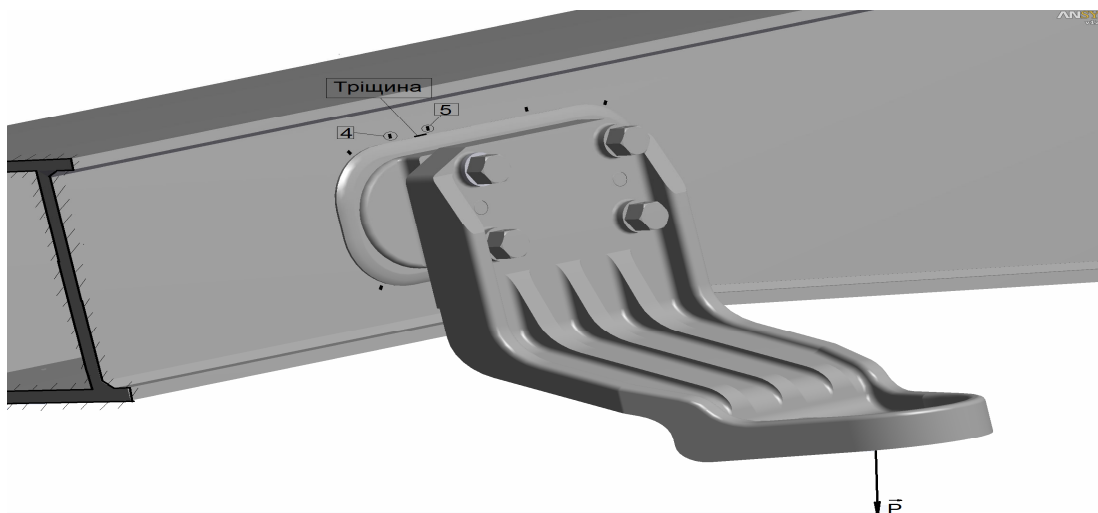


Рисунок 5а. Ескіз боковини рами візка електровоза ДСЗ

На рисунку відзначені місця встановлення тензорезисторів 4 та 5. Стрілкою показана дія сили, прикладеної до кронштейна. Величина цієї сили заміряна під час проведення ходових динаміко-міцнісних випробувань електровоза.

Ескіз фрагмента рами візка зроблено згідно з заводськими кресленнями у масштабі 1:1. Прийняті допущення: модуль Юнга сталі 09Г2С ГОСТ ГОСТ 19903-74 дорівнює $2,0 \cdot 10^5$ МПа; коефіцієнт Пуассона – 0,3; механічні властивості валика зварного шва такі ж, як і конструкційного матеріалу; відсутні залишкові термічні напруження; катет зварного шва має нахил 45° , радіуси переходу катета в основний метал були постійними і становили 6 мм. Тріщина моделювалась розрізом шириною 20 мкм у вигляді половини еліпса з довшою віссю 10 мм. Прийнято допущення, що концентрація напружень біля вершин тріщини не впливає на напружено-деформований стан елемента конструкції в місцях встановлення тензорезисторів. Місця розміщення тензорезисторів, призначених для моніторингу технічного стану елемента конструкції, моделювались константановими пластинками товщиною 10 мкм. Емуляція навантаження привареної до боковини рами візка накладки в місці її приєднання до кронштейна здійснена за умов дії максимального згинаючого моменту $M = 4759,6$ Нм. Розрахунок напружено-деформованого стану елемента конструкції здійснено в пружній постановці.

Експериментальні данні деформацій рами візка в місцях встановлення тензорезисторів були отримані за допомогою вимірювального комплексу БВК-6 та фольгових тензорезисторів КФ-6, використання яких описано в[5]. Значення амплітуди напружень, заміряних за допомогою БВК-6, практично співпадають з їх розрахунковими величинами, що свідчить про достовірність комп'ютерної моделі.

Встановлено, що максимальні розтягуючі напруження в біляшовній зоні виникають при навантаженні кронштейна силою, що діє вертикально вниз. Зумовлено це розташуванням ребер жорсткості в середині боковини рами візка локомотива. При виникненні втомної тріщин довжиною 10 мм у місці встановлення тензорезистора 5, виникають розтягуючі еквівалентні пружні напруження, середнє арифметичне значення

яких за результатами вимірювання в 4 точках становить 65МПа; а тензорезистора 4 – 53МПа (рис. 5б). У колонці наведені значення амплітуд еквівалентних напружень у МПа.

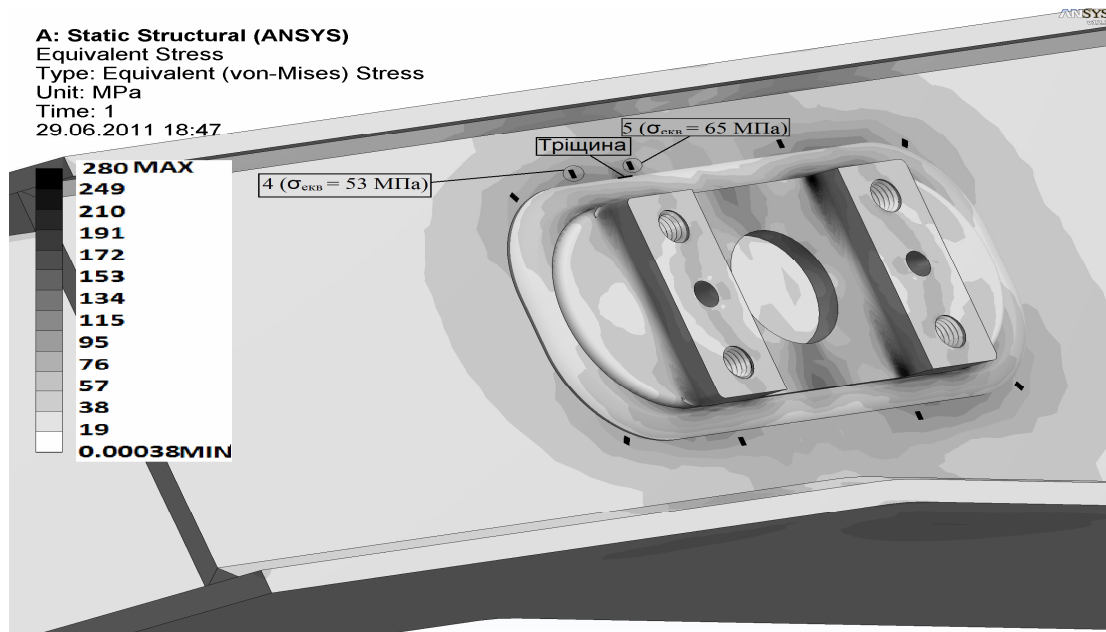


Рисунок 5б. Розподіл еквівалентних напружень в елементі конструкції рами візка електровоза ДСЗ

При довжині втомної тріщини 10 мм відносна деформація біля тензорезистора №5 становить $1,2 \cdot 10^{-3}$, біля тензорезистора №2 – $1,4 \cdot 10^{-3}$. Різниця деформацій складає 25%, яка може на 100% бути зареєстрована за допомогою приладу АВК-Т2.

На підставі цих досліджень протягом 3 років успішно експлуатується електровоз серії ДСЗ локомотивного депо станції Київ-пасажирський ДТГО “Південно-Західна залізниця” з відремонтованою рамою візка та неперервним моніторингом її технічного стану.

Висновки. Експериментально показано, що за допомогою фазового методу вимірювання відносної енергії виникнення та росту втомної тріщини в біляшовній зоні зварного з’єднання можливо збільшити чутливість нуля-індикаторного тензометричного методу виявлення тріщин. Скінченно-елементна комп’ютерна модель зразка з концентратором, який був випробуваний на установці “Шенк” без врахування конструкції захватів та способу його навантаження, дозволила розрахувати відносні деформації його поверхонь, які лише на 20% співпадають з експериментально отриманими величинами. Модель, яка враховувала кінематичну схему навантаження зразка, дозволила здійснити ці розрахунки з точністю 95%. Достовірність комп’ютерної моделі напружено-деформованого стану біляшовної зони приварки до боковини рами візка накладки кріплення кронштейна буксового гасника коливальних електровоза ДСЗ обґрунтована співпаданням розрахункових та експериментально отриманих значень механічних напружень у місцях встановлення тензорезисторів. Комп’ютерна модель зародження та росту втомної тріщини в цьому елементі конструкції показала 100% можливість їх виявлення нуля-індикаторним методом. Цей метод впроваджено у

Укрзалізниці для моніторингу технічного стану відремонтованої рами візка електровоза ДСЗ.

Література

1. Леонєць, В.А. Продовження терміну експлуатації рам візків електровозів ЧС7 [Текст] / В.А. Леонєць, А.О. Лукашевич, Л.М. Чаус // Прочность материалов и элементов конструкций: Труды Международной научно-технической конференции 28- 30 сентября 2010 г. / Отв. Ред. В.Т.Трощенко.- К: Ин-т проблем прочности им. Г.С.Писаренко НАН Украины,2011. – С. 854–860.
2. Система динамико-прочностных испытаний несущих конструкций подвижного состава и верхнего строения пути при повышенных скоростях движения [Текст] / В.А Леонєць, А.А. Леонєць, О.Д. Токарев [и др.] // Железные дороги мира. –2002. – №9. – С. 73–76.
3. Дегтярев, В.А. Деформационный критерий эффективности упрочнения сварных соединений высокочастотной механической проковкой [Текст] / В.А. Дегтярев, Б.С. Шульгинов, В.В. Кныш // Автомат. сварка. – 2006. – №9. – С. 3–11.
4. Реєстрація появи тріщин від утомленості у важкодоступних місцях рам візків залізничних локомотивів [Текст] / В.А. Леонєць, О.Д. Токарев, О.А. Леонєць [та ін.]: Цільова комплексна програма НАН України” Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин” / науковий керівник академік Б.Є. Патон: збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2007–2009 рр. за програмою „Ресурс”. – К.: ІЕЗ НАН України ,2006. – С. 431–434.
5. Тензометричний метод виявлення тріщин в рамі візка електровоза ДСЗ [Текст] / В.А. Леонєць, А.О. Лукашевич, В.О. Дегтярев [та ін.] // Пробл. міцності (в друці).
6. Трощенко, В.Т. Усталость и неупругость метал лов [Текст] / В.Т. Трощенко. – Киев: Науова думка, 1971. – 268с.
7. Сегерленд, Л. Применение метода конечных элементов [Текст] / Л. Сегерленд. – М: Мир,1979. – 389с.
8. Металлы. Методы испытаний на растяжение(СТ СЕВ 471-77): ГОСТ 1497-84. – [Действительный с 1986-01-01]. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 39с. (Межгосударственный стандарт).
9. Степанов, Н.В. Курс пользователя Pro/Engineer 2000i [Текст] / Н.В. Степанов, А.А. Голованов. – М.: КомпьютерПресс, 2000. – 190 с.
10. Kent L. Lawrence. ANSYS workbench Tutorial Release 11 / L. Lawrence Kent. – Kansas: Schroff Development Corporation, 2007. – 236р.