

УДК 624.07

КОНСТРУЮВАННЯ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ «КОНСЕРВАЦІЇ ТРІЩИН»

КОНСТРУИРОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА «КОНСЕРВАЦИЯ ТРЕЩИН»

CONSTRUCTION OF METAL CONSTRUCTIONS AT CENTRAL LOADING BY USING THE METHOD OF "TRISCHIVES CONSERVATION"

Стоянов В.В. д.т.н., проф., Коршак О.М. к.т.н., доц., Хоменська А.В. к.т.н., Чучмай С.М. к.т.н., доц., (Одеська державна академія будівництва та архітектури)
Бібіков А.У. інж. неч. уч-ка ДОФ

Стоянов В.В. д.т.н., проф., Коршак О.М. к.т.н., доц., Хоменская А.В. к.т.н., Чучмай С.М. к.т.н., доц., (Одесская государственная академия строительства и архитектуры)
Бибиков А.У. инж. неч. уч-ка ДОФ

Stoyanov V.V. Dr.Sc. (Eng.), Prof., Korshak O. M. Cand. Sc. (Eng.), Assist. Prof., Khomenskaya A.V. Cand. Sc. (Eng.), Chuchmay S.M. Cand. Sc. (Eng.), Assist. Prof. (Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture)
Bibikov A.U. engineer DOF

Анотація. Проблема використання методу «консервації тріщини» (мікротріщин або вже сформованих магістральних) дуже перспективна завдяки спрямованому (точковому) посиленню металу високомодульним матеріалом.

В статті розглядається методика «консервації тріщин». Основним принципом якого є влаштуванні на металеву поверхню накладок на основі вуглецевих волокон - ламінатів або полотен. Розглянуто основи методики розрахунку накладок з полотен. Приведено чисельний розрахунок з використанням обчислювальних комплексів «Ліра 9.4», «SCAD» та технологію проведення робіт по «консервації тріщини». Розглянуто практичне використання данної методики на діючому підприємстві дробильно-збагачувальної фабрики.

Анотація. Проблема використання методу «консервації тріщини» (мікротріщин або вже сформованих магістральних) дуже перспективна завдяки спрямованому (точковому) посиленню металу високомодульним матеріалом. У результаті такої «консервації тріщин» конструкція знову збільшує свою працездатність при тривалій дії циклічних навантажень.

Відомо, що чим вище модуль пружності, тим вище якість матеріалу, використовуваного для посилення конструкцій. Ця властивість виділяє вуглеволоконні матеріали серед інших фіброармованих полімерних матеріалів.

В статті розглядається методика «консервації тріщин». Основним принципом якого є влаштуванні на металеву поверхню накладок на основі вуглецевих волокон - ламінатів або полотен. Особливість циклічного вантаження полягає в тому, що у міру повторення цього процесу «розхитується» отвір тріщини та збільшується об'єм релаксуючого матеріалу, що зрештою підживлює пружною енергією ріст тріщини до критичної довжини $l_{кр.}$. Саме питання як уповільнити процес підживлення енергії тріщини, приводить нас до рішення, коли в пустотні тріщини «вводяться» зв'язки, що перешкоджають розсовуванню її берегів. Розглянуто основи методики розрахунку накладок з полотен. По-перше, товщина накладки δ_n не повинна помітно порушувати геометрію виробу. По-друге, матеріал накладки при обмеженні її по товщині для забезпечення роботи зв'язку на розтягування, повинен мати величину межі міцності на порядок вище, ніж метал, при цьому модуль пружності матеріалу

накладки для забезпечення згинальної жорсткості не має бути менше ніж у сталі. Приведено чисельний розрахунок з використанням обчислювальних комплексів «Ліра 9.4», «SCAD» та технологію проведення робіт по «консервації тріщини». Розглянуто практичне використання даної методики на діючому підприємстві дробильно-збагачувальної фабрики.

Аннотация. Проблема использования метода «консервации трещины» (микротрещин или уже сложившихся магистральных) очень перспективна благодаря направленному (точечному) усилению металла высокомодульным материалом. В результате такой «консервации трещин» конструкция снова увеличивает свою работоспособность при длительном воздействии циклических нагрузок.

Известно, что чем выше модуль упругости, тем выше качество материала, используемого для усиления конструкций. Это свойство выделяет углеволоконный материал среди других фиброармованных полимерных материалов.

В статье рассматривается методика «консервации трещин». Основным принципом которого является устройство на металлическую поверхность накладок на основе углеродных волокон - ламинатов или полотен. Особенность циклического нагружения состоит в том, что по мере повторения этого процесса «расшатывается» отверстие трещины и увеличивается объем релаксирующего материала, в конце концов подпитывает упругой энергией рост трещины до критической длины $l_{кр}$.. Именно вопрос как замедлить процесс подпитки энергии трещины, приводит нас к решению, когда в пустотные трещины «вводятся» связи, препятствующие раздвижению ее берегов. Розглянуто основи методики расчета накладок с полотен. Во-первых, толщина наклейки ДН не должна заметно нарушать геометрию изделия. Во-вторых, материал наклейки при ограничении ее по толщине для обеспечения работы связи на растяжение, должен иметь величину предела прочности на порядок выше, чем металл, при этом модуль упругости материала наклейки для обеспечения изгибной жесткости не должно меньше чем у стали. Приведены численный расчет с использованием вычислительных комплексов «Ліра 9.4», «SCAD» и технологию проведения работ по «консервации трещины». Рассмотрены практические приложения данной методики на действующем в предприятии дробильно-обогащительной фабрики.

Anotation. The problem of using the method of "conservation of the crack" (microcracks or already formed trunk) is very promising due to the directed (point) strengthening of the metal with high modulus material. As a result of such a "conservation of cracks", the design again increases its capacity for long-term cyclic loads.

It is known that the higher the modulus of elasticity, the higher the quality of the material used to strengthen the structures. This property allocates carbon-fiber materials among other fibrous polymeric materials. The article deals with the method of "conservation of cracks". The main principle is the installation of metal linings on the basis of carbon fiber laminates or linings. The feature of cyclic loading is that as the process of this process repeats, the opening of the crack "breaks" and increases the volume of the relaxing material, which ultimately feeds the elastic energy of the growth of the crack to a critical length l_{kr} .. The question of how to slow down the process of feeding the energy of the crack leads us to the decision, when in the hollow cracks "introduced" ties preventing the dispersal of its shores. The foundations of the methodology for calculating linings from canvases are examined. Firstly, the thickness of the lining δ_n should not noticeably affect the geometry of the product. Secondly, the material of the lining, when limited in thickness to provide stretching bonding, should have a magnitude of strength equal to an order of magnitude higher than the metal, with the elastic modulus of the material to provide bending stiffness should not be less than in steel. The numerical calculation with the use of computing systems "Lira 9.4", "SCAD" and the technology of "cracking conservation" works is presented. The practical use of this technique in the operating enterprise of the crushing and concentrating factory is considered.

Вступ.

Металеві конструкції у світлі методики розрахунку по граничним станам, як відомо, розраховують по двох граничних станах. Оцінка експлуатаційних якостей по третьому граничному стану тріщиноутворюванню - не робиться. В той же час, відомо немало випадків, коли навіть за наявності тріщин, як на основному металі, так і в зварних швах конструкції ще не втратили своїх експлуатаційних якостей в якийсь період, знаходячись в предаварійному стані, виконують свої функції (приховані тріщини у фасонках, у поясах та зварних швах підкранових балок, в елементах конструкцій, працюючих на знакозмінне навантаження, та ін.). Проблема механіки руйнування виробів з металів за наявності тріщин досі є актуальною та доки управляти її розвитком ми не вміємо, а ось «консервувати» тріщину можливо. Це означає уповільнення росту тріщини при циклічному навантаженні конструкцій, тобто обмеження можливості розсовування її берегів на визначений період.

Уперше поняття про «консервацію» тріщини було введено проф. Стояновим В.В. у 2004р. [1].

Основні положення.

Основний принцип методу «консервації тріщин» полягає в встановленні на металеву поверхню накладок на основі вуглецевих волокон - ламінованих або полотен. У результаті такої «консервації тріщин» конструкція знову збільшує свою працездатність при тривалій дії циклічних навантажень.

Відомо, що чим вище модуль пружності, тим вище якість матеріалу, використовуваного для посилення конструкцій. Ця властивість виділяє вуглеволоконні матеріали серед інших фіброармованих полімерних матеріалів.

Нині лідерами в Європі по дослідженню і застосуванню вуглепластиків у будівництві являється швейцарська фірма «SikaCarboDur».

У нашій роботі були використані такі матеріали для посилення металевих конструкцій як вуглепластикові полотна SiksWrap®- 430G та клей Sikadur®- 330.

Особливості руйнування металевих конструкцій.

Будь-який елемент металевої конструкції, численні дефекти якої стали результатом виробництва сталі або отримані при виготовленні, транспортуванні, монтажу або експлуатації конструкції.

Вивчаючи статистику руйнувань резервуарів, можна відмітити, що на практиці більшість крихких руйнувань у вертикальних резервуарах виникають від зварювальних дефектів або тріщин малоциклової втоми, що виникають поблизу місць концентрації напружень. Характерними місцями руйнувань є технологічні отвори, монтажні з'єднання. Крихке руйнування вертикальних сталевих резервуарів відбувається під впливом комплексу несприятливих чинників, які визначають крихке руйнування резервуарів, можна назвати температуру, пониження температури впливає на міцність металу. Відомо, що в металі без тріщин та надрізів міцність при пониженні температури не знижується, а в металі з концентраторами напруги руйнування стає крихкішим з пониженням температури.

Характерними ушкодженнями підкранових балок є тріщини поясних швів верхнього поясу, тріщини в стінці накінцевках ребер жорсткості, тріщини уперек розтягнутого пояса; тріщини в ребрах жорсткості, локальні вигини полиць, загальний вигин в площині балки, загальні прогини локальних вигинів полиць, локальні вигини стінок разом з ребрами жорсткості. Для зварних підкранових балок головним типом ушкоджень є тріщини поясних швів верхнього пояса, добре фіксується закономірність кількості таких ушкоджень від терміну експлуатації.

Форми руйнування металевих конструкцій розрізняють залежно від виду напруженого стану, швидкості прикладеного навантаження та інших дій.

Звернемо свою увагу на такі види руйнування як крихке і втомне.

Крихке руйнування відбувається при невеликих пластичних деформаціях та невеликій витраті енергії. Підрозділяють його на ідеально крихке (пружне), таке, що відбувається без пластичної деформації таквазкрихке. Квазікрихким називають таке руйнування, при якому перед краєм тріщини виникає невелика зона пластичності, а інша частина тіла зазнає пружну деформацію. Важливо, відмітити що при квазікрихкому руйнуванні руйнівна напруга в ослабленому перерізі вище межі плинності, але не нижче міцності.

Коли циклічна напруга перевищує межу плинності, усередині кристалічної структури металу спостерігається певна перебудова, яка значно знижує порогову величину роботи руйнування. В результаті, самі незначні поверхневі тріщини можуть стати причиною руйнування.

Високомодульний полімерний матеріал, рекомендований для «консервації тріщини».

Вуглеволоконним матеріалам властиві механічні характеристики значно перевершуючі властивості стали - їх прямого конкуренту;

- високий модуль пружності до 640Гпа;
- міцність на розтягування до 3000МПа;
- висока міра витривалості і втомної міцності ;
- високий опір динамічним навантаженням;
- неохильність до корозії та ін.

Це що складається з вуглецевого волокна з вуглецевого волокна і полімерних смол композитний матеріал. Волокна розташовуються в матриці з полімерних смол (у нашому випадку, епоксидною). Вуглецеві волокна є тонкими волокнами близько 0,005-0,010 мм в діаметрі, що складаються в основному з атомів вуглецю, сполучених разом в мікроскопічні кристали, які більш менш розташовані паралельно довжині осі волокна. Декілька тисяч волокон вуглецю скручені у формі ниток можуть бути використані самостійно, або сплетені в тканину. Тканина з вуглецевого волокна укладається в потрібну форму, як правило, вручну, після чого вона запікається в полімері під тиском, та виходить вуглепластик.

Основи методу «консервації тріщин».

Особливість циклічного вантаження полягає в тому, що у міру повторення цього процесу «розхитується» отвір тріщини та збільшується об'єм релаксуючого матеріалу, що зрештою підживлює пружною енергією ріст тріщини до критичної довжини $l_{кр.}$. Саме питання як уповільнити процес підживлення енергії тріщини, приводить нас до рішення, коли в пустотні тріщини «вводяться» зв'язки, що перешкоджають розсовуванню її берегів.

Практично це виглядає у вигляді накладки, до якої пред'являються тяжкі умови.

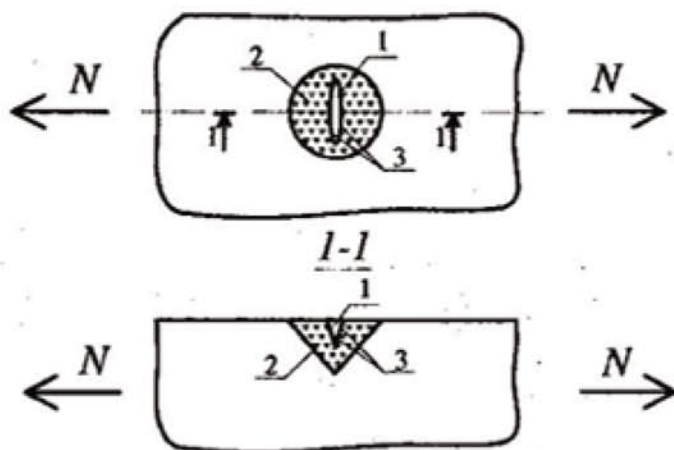


Рис.1 Схема розташування області релаксації тріщини
1 – тріщина, 2 – область релаксації, 3 – берега тріщини.

Практично це має вигляд накладки до якої пред'являються високі вимоги.

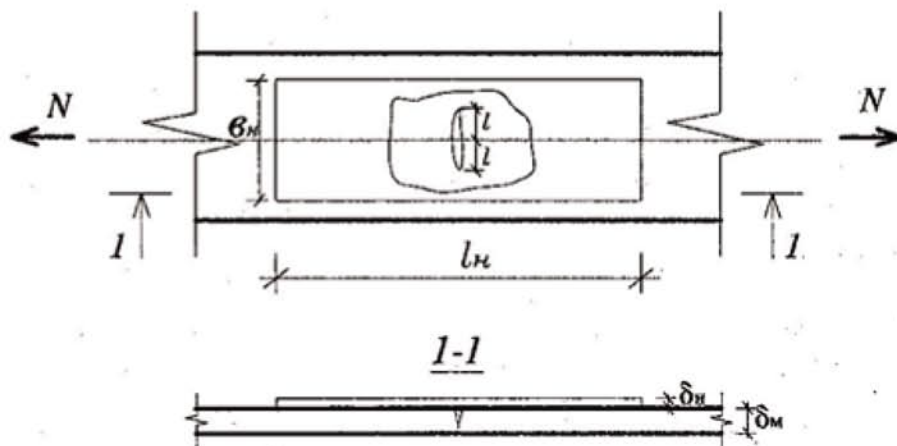


Рис.2 Схема розташування накладки на тріщині.

По-перше, товщина накладки δ_n не повинна помітно порушувати геометрію виробу. Наприклад, у разі використання накладки тієї ж товщини, що і основний матеріал, тобто $\delta_n = \delta_m$ концентрація напруги у краю клейового шва може зрости у багато разів. По-друге, матеріал накладки при обмеженні її по товщині для забезпечення роботи зв'язку на розтягування, повинен мати величину межі міцності на порядок вище, ніж метал, при цьому модуль пружності матеріалу накладки для забезпечення згинальної жорсткості не має бути менше ніж у сталі :

$$\delta_n \leq 1/15 - 20\delta_m; E_n \geq E_{ст}; \sigma_{пр.н.} > \sigma_n.$$

Де δ_n і δ_m - товщина відповідно до накладки і металу;

$E_n, E_{ст}$ - модулі пружності;

$\sigma_{пр.н.}, \sigma_n$ - величина межі міцності металу конструкцій.

Матеріалом, що задовольняє позначені вище вимоги, відповідає вуглепластик.

Проблема використання методу «консервації» тріщини (мікротріщин або вже сформованих магістральних) дуже перспективна завдяки спрямованому (точковому) посиленню металу високомодульним матеріалом. Слід розуміти, що незважаючи на використання сучасних матеріалів, одним найважливішим моментом є вивчення роботи підсилюючої конструкції, щоб вуглепластикові накладки максимально точно зайняли необхідні проблемні місця.

Довжину накладки приймають з розрахунку забезпечення необхідного майданчика для роботи клейового шва на сколювання. Ширину накладки (b_n) призначають з умови закриття простору з метою вирівняти можливі концентрації напруги. При цьому тимчасова межа міцності на розтягування матеріалу накладки має бути більша на порядок показника металу стінки.

Чисельний розрахунок на базі обчислювальних комплексів «Ліра 9.4», «Scad»

«SCAD», «ЛІРА» - це системи, що базуються на методі кінцевих елементів (МКЕ) та призначені для розрахунку напружено-деформованого стану (ПДВ), стійкості, визначення частот і форм власних коливань, аналізу температурних впливів, рішення завдань статички та динаміки в лінійній або нелінійній постановці, а також широкого класу будівельних, машинобудівних та інших завдань. Згідно МКЕ, модель конструкції складної форми розбивається на простіші форми, в межах яких визначається наближене рішення. Результатом такого моделювання зазвичай є поле напруги та зміщень в цільній конструкції.

Для розрахунку можуть бути розглянуті зразки еталонного типу, зразки з тріщиною без посилення, моделі з штучною тріщиною посилені вуглепластиком (1-3 шарами).

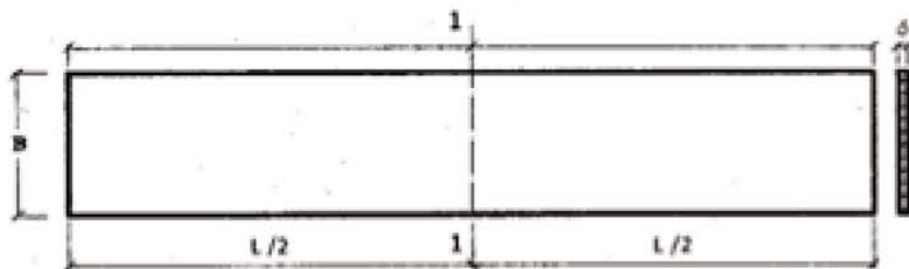


Рис.3 Схема металового зразка еталонного типу.

На більшій частині зразків по лінії 1-1 можливо влаштовувати різні штучні дефекти. Це в основному штучні поперечні тріщини в центральній частині зразка (розмірами 15x0,3 мм та інші).

Результати розрахунку вказують на високу продуктивність використання накладок (див. додаток 1-4).

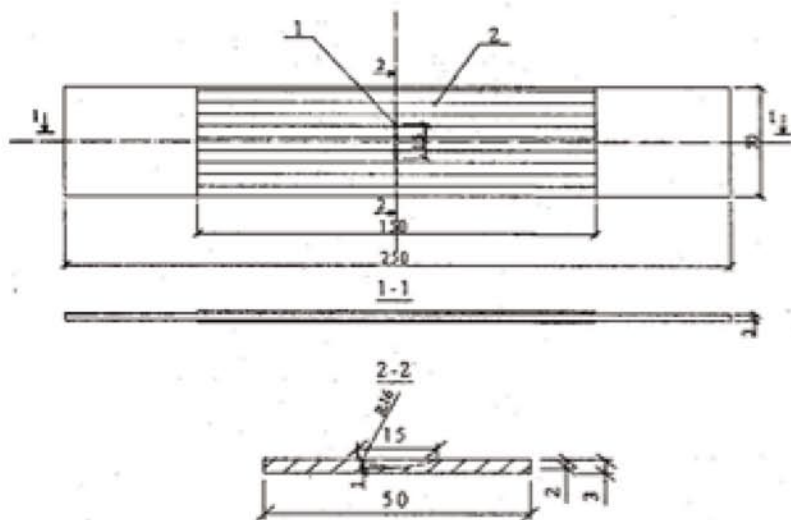


Рис.4 Схема металового зразка з тріщиною

1- тріщина 15x0,5 мм, 2 – зона влаштування накладки з вуглепластикового полотна

В першу чергу зростає ефективність використання вуглепластику. При однаковій довжині «консервованої» тріщини вузька смуга вуглепластику (натомість повноцінному відрізу полотна) дозволяє майже удвічі зменшити коефіцієнт інтенсивності напруги.

По-друге, виявляється можливим цілком досить обійтися для металу завтовшки 3 мм накладками з одного полотна.

По-третє, різко зменшуючи площу покриття, власне зменшується витрата вуглепластику.

Критична довжина тріщини при несприятливому завантаженні, коли $\sigma_n=250$ МПа та накладки з одного полотна складає $l_{кр}=71$ мм (проти 16 мм в неопореному режимі)

Усе це свідчить про високий ресурс роботи зразка в режимі циклічного вантаження при використанні розрахунку зразків при номінальній напрузі $\sigma_n=150$ МПа, $\sigma_n=200$ МПа, $\sigma_n=250$ МПа.

Технологія проведення робіт по «консервації тріщин».

Sikadur - 330 що не містить розчинників, тиксотропний, конструкційний двокомпонентний клей:

- хімічна основа - епоксидна смола;
- міцність на розтягування - Н/мм²(7 діб при +23⁰С).

Тканина SikaWrap - 430G - односпрямоване скловолокно

- модуль пружності при розтягуванні волокна - 76 кН/мм².
- міцність на розтягування - 2,3 кН/мм².

Важливим елементом методики випробувань складала якість склеювання полотна з вуглепластику з металом і склеювання полотен між собою. Для цього витримувалися усі необхідні вимоги фірми «SikaCarbodur» по вибору клею та технології склеювання.

1. Тканина необхідних розмірів нарізається спеціальними ножицями або гострим ножем.

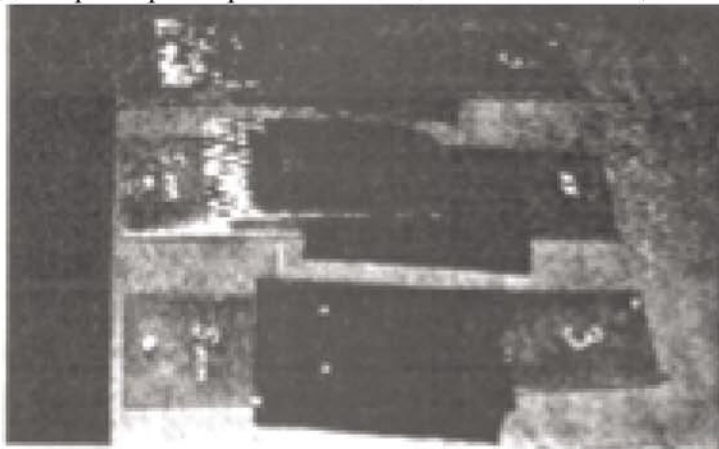


Рис.5 Необхідні розміри вуглепластикового полотна, для підсилення зразків

2. Основу готують, шліфуючи і знежирюючи її. Необхідно, щоб поверхні, на які наноситься клей, були рівними, чистими, сухими.
3. Підготувати клей згідно з технічною картою, наданою представником фірми-виробника.
4. Нанести клей Sikadur - 330 на підготовлену основу пензлем або кельмою.
5. Укласти тканину у бажаному напрямі. Акуратно розкочати тканину по клею роликком з пластика, поки клей не проступить між волокнами тканини. Розкочувати тканину роликком, поки не утвориться гомогенна структура. Напрямок розкочування тільки уздовж волокон.
6. Якщо тканину укладати в декілька шарів, то необхідно повторно нанести шар клею. Укладання наступних шарів тканини повинна відбуватися протягом 1 години. Якщо це неможливо, то необхідно почекати не менше 12 годин.

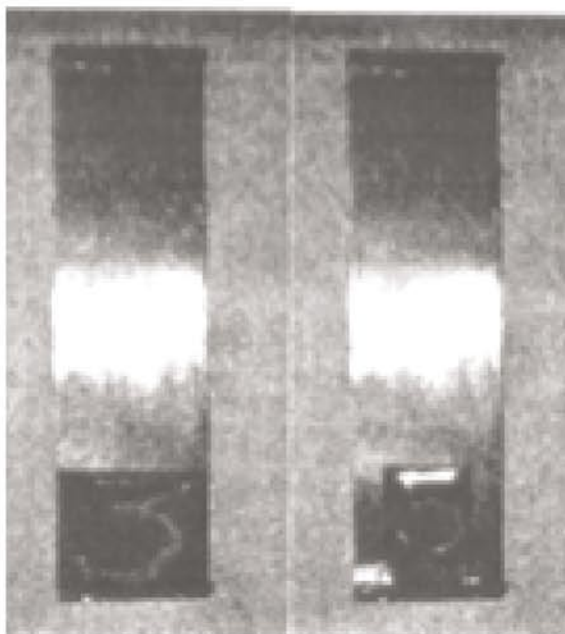


Рис.6 Зразки відшліфовані та знежирені

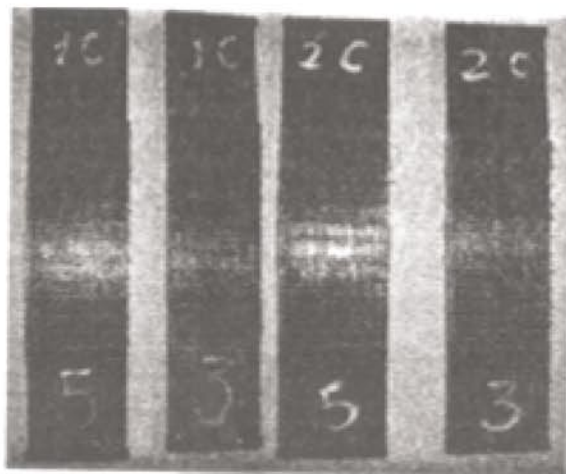


Рис.7 Утворена гомогенна структура на поверхні підсиленого зразка

Для створення повноцінного клейового шва (що відповідає максимально можливим задекларованим в технічних картах на матеріали межі міцності на розтягування 30 МПа) слід, окрім рекомендованих вимог, забезпечити відомий мінімальний тиск склеювання $-0,6-0,8$ МПа.

Минулого року (2017 р.) Бібіков А.В. на лекції познайомився з поняттям «Консервації тріщин» в металевих конструкціях, а цього року (2018 р.) самостійно здійснив влаштування декількох вуглепластикових накладок у вигляді «консервації тріщин» на стінках параболічного бункера дробильно-збагачувальної фабрики ПрАТ «Полтавський ГЗК» (рис. 8).

На збагачувальній фабриці розташоване два параболічних бункера 18 м, що складаються з гнучких стінок, бункерних поздовжніх балок, ригелів рам (одночасно рамами каркаса будівлі), конструкцій перекриттів (системи другорядних балок і системи горизонтальних зв'язків між ригелями рам і залізобетонних плит перекриттів по верху рам), розвантажувальних воронок, торцевих стінок і футерування.

Виконано ремонт тріщини в стінці ЗФ-1 по ряду А осі 35 за раніше виданою робочою документацією, що розроблена ТОВ «ПКБ-ПСК» (рис. 9).

Робоча документація на ремонт тріщин в стінках параболічних бункерів повинна виконуватись у повній відповідності до ДСТУ Б.В.3.1-2:2016. В цьому документі рекомендується (з застосуванням вуглепластикових накладок).



Рис.8 Загальний вигляд цегу збагачувальної фабрики

Спочатку випробувань (березень) температура в корпусі становила + 10 гр.С, в липні + 40 гр.С, вересень + 20гр.С. Станом на 17.09.2018г. спостерігається однорідність і цілісність накладки. Яких-небудь зсувів і деформацій немає (рис. 9).



Рис.8 Відремонтована тріщина в корпусі бункера методом консервації

Література.

1. Стоянов В.В. «Новые подходы обеспечения несущей способности строительных металлических конструкций в полном объеме срока эксплуатации», К. Сталь, 2004, с.280-292
2. Strengthening of structures with CERP strips SikaCarboDur Convention? 1997
3. Стоянов В.В. «Металлические резервуары – некоторые проблемы проектирования и реконструкции», Д., УАМК, 2007, с.45-49
4. Стоянов В.В. «Консервация» трещин как способ продления срока работоспособности». В журнале «Промислове будівництво, інженерні споруди», № 4, К., Укрпроектстальконструкції, 2009
5. Стоянов В.В. Мазин Ж. Алаид «Испытания на выносливость растянутых металлических образцов с нормальной и искусственной рецинной». В сб. Современные строительные конструкции. О., Внешрекламсервис, 2009, с.51-58
6. Стоянов В.В. Прогнозирование динамической усталости элементов металлических конструкций при циклическом нагружении. В сб. Современные металлические конструкции. О. Внешрекламсервис, 2010, с.1-11.
7. Стальные конструкции СНиП II-23-81*, М., 2005
8. Стоянов В.В., Мазин Ж. Алаид «Долговечность металлических составных подкрановых балок при местном усилении углепластиком». В сб. Современные строительные конструкции О. Внешрекламсервис, 2010, с 258-263.