

Реферати статей з журналу

«Welding in the World», №7, 2020 р.*

Фізичні основи та моделювання повзучості в сталях. *Stan T. Mandziej*, pp. 1119-1134

Симулятивний тест на прискорену повзучість був розроблений як відповідь на загальну потребу отримати в короткі терміни корисні фізичні дані для визначення довготривалої поведінки матеріалів, що піддаються експлуатації в умовах напруги при підвищених температурах у виробництві електроенергії та хімічній промисловості. Крім того, останні часті зупинки електростанції через додавання сонячної / вітрової енергії до мережі вимагають отримання даних про втомну повзучість, які не можуть надати стандартні випробування на повзучість. У відповідь на ці потреби було розроблено процедуру термомеханічної втоми, яка враховувала фізичні явища, що спричиняють трансформацію мікроструктури під час повзучості, зокрема, породження дислокаційних підструктур, їх роль у зародженні порожнеч і тріщин, активізації осаждення карбідів та зниженню механічних властивостей при тривалому впливі підвищених температур. Фактична процедура теста генерує адекватні дані для розрахунку справжнього терміну експлуатації випробуваного матеріалу, що витримує повзучість, для номінального напруження.

Дослідження мікроструктури швів на зварних з'єднаннях дуплексних нержавіючих сталей з використанням технології дугової термічної обробки. *Andrea Putz, Vahid A. Hosseini, Elin M. Westin & Norbert Enzinger*, pp.1135-1147

Техніка термічної обробки застосовувалася для з'єднань стандартних дуплексних нержавіючих сталей з метою дослідження впливу термічної обробки, наприклад, при багатопрохідному зварюванні, на мікроструктуру швів. За допомогою нерухокої дуги в межах одного зразка розвивається просторове стаціонарне температурне поле, що змінюється від ліквідусу до кімнатної температури, і призводить до зміни мікроструктури. Дугову термічну обробку застосовували протягом 10 та 60 хв відповідно, а результати експериментів порівнювали з термодинамічними розрахунками. Металографічні дослідження виявили утворення вторинних фаз у різних зонах. Для термообробленого зразка протягом 10 хв утворення σ -фази спостерігалось у температурному діапазоні 730...1000 °C, а ψ -фаза виявлена вище 700 °C. Для зразка 60 хв обробки σ -фаза утворилася між 675 і 1025 °C, тоді як ψ -фаза утворилася вище 600 °C. В обох зразках спостерігали трансформацію ψ -фази в σ -фазу, а також утворення вторинного аустеніту при 575...1100 °C. Виміри твердості визначили крихкі ділянки, які корелювали з областями,

* «Welding in the World», Vol. 64, Issue 7

збагаченими σ -фазою та розкладанням фериту. Порівняно з початковою мікроструктурою, регіони з вторинними фазами виявляли підвищену чутливість до локальної корозії при випробуванні відповідно до ASTM A262-Practice A.

Вплив змінних параметрів на тиск дуги при GTAW процесі. *Gabriel de Simas Asquel, Ana Paula Storto Bittencourt & Tiago Vieira da Cunha*, pp. 1149-1160

У даній роботі представлено вплив зварювального струму, відстані електрода-заготовки, складу електрода, діаметра електрода кута нахилу наконечника електрода, складу екрануючого газу та частоти імпульсних струмів на тиск газової вольфрамової дуги (GTAW). У цьому дослідженні були проведені випробування на тиск дуги над отвором діаметром 1 мм на мідній пластині, що не плавиться, з водяним охолодженням. Отвір було з'єднано з датчиком диференціального тиску через подовжувальну трубку. Як результат, тиск зварювальної дуги був прямо пропорційним квадрату зварювального струму та діаметру вольфрамового електрода. Більше того, тиск збільшується в міру зменшення відстані електрода-заготовки і обернено пропорційний куту нахилу наконечника електрода для кутів, що перевищують 45 °. Також електродний склад, частота імпульсного струму та газовий склад впливають на тиск зварювальної дуги.

Вплив залишкових напружень в зварних швах, отриманих при електронно-променевому зварюванні, на оцінку температури припинення росту тріщини. *Chiyomi Iwatake, Masahito Kaneko, Kazuyuki Matsumoto, Tsutomu Fukui, Shuji Aihara & Tomoya Kawabata*, pp. 1161-1174

Концепція припинення росту крихких тріщин останнім часом стала міжнародною проблемою для контейнерних суден. Міжнародна асоціація класифікаційного товариства (IACS) також призначила єдину вимогу (UR – unified requirement) для способу припинення росту крихких тріщин, і спосіб припинення росту крихких тріщин було схвалено на міжнародному рівні. В якості одного з методів оцінки крихкої тріщиностійкості в 1990-і роки була запропонована концепція температури припинення росту крихких тріщин (CAT – crack arrest temperature), яка заснована на ізотермічному тесті припинення росту тріщини. Цей концепт застосовувався головним чином для проектування резервуарів. Однак не було встановлено жодного стандарту, що описує детальну процедуру оцінки. Це означає, що тільки обмежені організації можуть оцінювати CAT, і це вважається проблемою, коли оцінка проведення зупинки санкціонована в якості міжнародного стандарту. На тлі таких обставин

японські дослідницькі групи, включаючи Японське зварювальне інженерне товариство (JWES) і Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK), почали стандартизацію для випробувань CAT у 2016 р. Були досліджені різні аспекти керуючих факторів на основі результатів численних експериментів і чисельних розрахунків. Випробування CAT повинно включати зону окрихчення для ініціювання крихкої тріщини. До окрихненої зони можна застосувати або лінійний перепплав електронного пучка (ЕП), або локальний градієнт температури (LTG – local temperature gradient). Навіть якщо ми зосередимося тільки на зварюванні ЕП, дефекти зварювання в зоні окрихчення можуть бути впливовим фактором. У цій доповіді ми досліджуємо вплив залишкових напруг при зварюванні ЕП на рушійну силу розкриття тріщини, яка визначається як величина K за допомогою методу кінцевих елементів 3D (МКЕ). В результаті ми підтвердили існування залишкової напруги, що не може бути проігнорована, яка утворюється на поверхні зварюваної ділянки ЕП; однак вплив цього на величину K вважається незначним, якщо умови випробувань CAT можуть достатньо забезпечити довжину тріщини. Цей результат показує, що рушійна сила в точці зупинення CAT може бути просто оцінена формулою LEFM (linear elastic fracture mechanics) без урахування залишкової напруги зварного шва ЕП для окрихчення.

Вплив окалини на геометрію зварного шару та тепловий цикл при зварюванні GTA високоміцних сталей. *Rahul Sharma, Uwe Reisgen*, pp. 1175-1183

Високоміцні сталеві важкі плити після виробництва зазвичай покриваються окалиною. Її морфологія, структура та хімічний склад визначаються декількома факторами, наприклад, параметрами прокатки, швидкістю охолодження, методом гасіння та легуючими елементами. Окаліну перед зварюванням бажано видалити. У зварювальній практиці видалення окалини в багатьох випадках недостатнє і може призвести до дефектів зварювання. У цій роботі проаналізовано вплив шару окалини на геометрію зварного шару та тепловий цикл під час зварювання GTA. Кілька високоміцних сталей з різним хімічним складом та товщиною пластин використовувались для зварювання.

Чисельне дослідження методів оцінки CTOD для лазерних зварних швів. *Yasuhito Takashima, Chendong Shao, Fenggui Lu & Fumiyoshi Minami*, pp. 1185-1193

У даній роботі запропоновано метод оцінки розкриття у вершині тріщини (CTOD – crack tip opening displacement) в лазерних зварних швах. Теоретична модель оцінки CTOD розроблена Dugdale and Wilby et al. (Модель DBCS) була використана для лазерного зварювання пластин. Напряга текучості металу лазерного шва і вузька ширина твердої зони впливали на CTOD, і була досліджена корекція напруги плинності з використанням моделі DBCS для отримання відповідної оцінки CTOD. Для застосування моделі DBCS до оцінки CTOD для лазерних звар-

них швів була запропонована еквівалентна концепція межі плинності. Еквівалентна напруга плинності залежала від коефіцієнта неузгодженості міцності і ширини твердої зони, оскільки напруга плинності металу лазерного шва зменшується з втратою обмеження, викликаної пластичною деформацією, яка сталася в основному металі. Прогнозований CTOD за величиною прикладеного навантаження, отриманий з використанням запропонованого методу оцінки, добре узгоджується з експериментальними критичними CTOD для лазерних зварних швів конструкційної сталі класу 780 і 520 МПа.

Залишкові напруги в термітних зварних рейках: значення додаткової ковки. *B. Lennart Josefson, R. Bisschop, M. Messaadi, J. Hantusch*, pp. 1195-1212

Процес алюмотермічного зварювання (ATW – aluminothermic welding) – це найчастіше застосовуваний процес зварювання для зварювання рейок (колії) у польових умовах. Велика кількість металу зварного шва, що додається в процесі ATW, може призвести до широкої нерівномірної поверхні головки рейки, що в рідкісних випадках може призвести до нерівномірності зносу та пластичної деформації через високі динамічні зусилля коліс-рейок при проходженні коліс. Ця стаття вивчає впровадження додаткового кування в процес ATW, призначеного для зменшення ширини зони, на яку впливає тепловіддача, не створюючи при цьому більш згубного залишкового поля напруги. Моделювання з використанням нової термомеханічної моделі TE процесу ATW показують, що додавання тиску кування призводить до дещо меншої ширини зони, на яку впливає тепло. Це також виявляється в металургійному дослідженні, показуючи, що ця зона (зона зварного металу та зона, що зазнає впливу тепла) є повністю перлітною. Лише граничні відмінності виявляються в залишковому напруженому полі, коли застосовується додаткове кування. В обох випадках великі залишкові напруги при розтягуванні знаходяться в рейці на шві при зварюванні. Додаткове кування може підвищити ризик гарячого розтріскування через збільшення пластичних деформацій у зоні, що зварюється.

Аналіз EBSD мікроструктур та механічних властивостей пом'якшених зон у зварному з'єднанні трубопроводу із сталі X60 після циклічної пластичної деформації. *Yuanbo Jiang, Chengning Li, Xinjie Di, Dongpo Wang, Jiangcheng Liu*, pp. 1213-1225

Метою цього дослідження було оцінити мікроструктурну еволюцію розм'якшених зон після циклічної пластичної деформації (CPD – cyclic plastic deformation) та вплив CPD на механічні властивості зварних з'єднань трубопроводів із сталі X60. Результати показали, що існування пом'якшеної зони призвело до того, що деформація в основному концентрувалася в цій області в процесі CPD. Мінімальна твердість пом'якшеної зони була на HV 18 меншою, ніж основний метал (ОМ). Коли глобальна деформація зварних з'єднань зросла з початкового стану без CPD до 5 % деформації, середня дезорієнтація ядра

міжкритичного ЗТВ, незначно зросла з 0,66 до 0,87°, що призвело до незначного зростання твердості. Незважаючи на наявність пом'якшених зон у ЗТВ, розташування розриву при розтягуванні було на ОМ, що пояснювалося комбінованим ефектом робочого зміцнення в пом'якшених зонах типу канавки, та стримуючим ефектом зварного з'єднання незалежно від рівні деформації CPD. Зниження пластичності зварних з'єднань було зумовлено концентрацією напруги, викликаною дислокаційними накопиченнями в процесі CPD, а потім призводило до раннього утворення мікроволокон.

Лазерне трансмісійне зварювання напівкристалічного поліпропілену без поглинаючих агентів за допомогою квазісинхронної стратегії опромінення. *Nam-Phong Nguyen, Stefan Behrens, Maximilian Brosda, Alexander Olowinsky & Arnold Gillner*, pp. 1227-1235

На відміну від інших методів з'єднання, лазерне трансмісійне зварювання надає унікальні переваги, такі як селективну та безконтактну передачу енергії. Це дозволяє виготовляти шви зі складною геометрією при малих механічних і теплових навантаженнях. Однак використання поглинаючих добавок для нижньої поверхні, що з'єднується, таких як сажа, є вирішальним, оскільки більшість полімерів прозорі в спектральному діапазоні типових джерел лазерного пучка (800...1100 нм). Новим підходом є застосування джерел пучка, що випромінюють в межах власних смуг поглинання полімерів між 1500 і 2000 нм. Це дає можливість лазерного зварювання прозорих полімерів без абсорбуючих агентів для медичних чи мікрофлюїдних застосувань, таких як пристрої Lab-on-a-Chip. З іншого боку, основним недоліком є велика зона термічного впливу (ЗТВ) через об'ємне поглинання, яке розповсюджується на весь поперечний переріз. Можливий спосіб подолати цей недолік – це квазісинхронна стратегія опромінення. У минулому було доведено, що ЗТВ полікарбонату (ПК) може бути зменшена у вертикальному напрямку до 30 % порівняно з контурним зварюванням. Оскільки ефекти розсіювання випромінювання при квазісинхронній стратегії опромінення без абсорбуючих агентів досі невідомі, розповсюдження пучка моделювалося в поліпропілені (ПП). На основі отриманих результатів було проведено теплове моделювання зварювального процесу за допомогою методу кінцевих елементів (МКЕ). Надалі імітаційну модель оцінювали шляхом порівняння результатів з експериментальними випробуваннями.

Порівняння впливу очищеного відшарування з HFMI-обробкою або використанням витратних матеріалів ЛТТ на міцність втомлення сталі з 1300 МПа. *Ebrahim Harati, Lars-Erik Svensson & Leif Karlsson*, pp. 1237-1244

Були виготовлені зразки Т-образних з'єднань з сталі міцності 1300 МПа, використовуючи звичайні або низькі температури трансформації (ЛТТ – low transformation temperature). Зварені зразки або

піддавалися обробці високочастотним механічним впливом (HFMI – to high-frequency mechanical impact), або обстрілюванню. Випробування на втому проводили при повністю зворотному, постійному амплітудному навантаженні на згин. Удар бойком привів до значного збільшення сили втоми протягом більш ніж 50 000 циклів. Зварні ЛТТ шви мали найвищу втомну міцність, звичайні зварні шви мали дещо меншу втомну в'язкість. Обробка HFMI звичайними та ЛТТ зварними швами також покращила втомну в'язкість, але в меншій мірі, підтримуючи нахил у діаграмі SN близько трьох, тоді як зразки, відстріляні, мали нахил 5-7. Значні відмінності в стисканні залишкового напруження спостерігалися між різними зварними швами, причому найбільше напруження при стисненні було виявлено у зразках після пострілу. Це, мабуть, було однією з головних причин покращення терміну втомленості відстріляних зразків.

Вплив підвищеної в'язкості, коефіцієнта R та товщини пластини на стійкість до стомлення сталевих з'єднань після високочастотного механічного впливу (HFMI). *M. Leitner & Z. Barsoum*, pp. 1245-1259

У 2016 р. Міжнародний інститут зварювання (IWI) опублікував рекомендацію щодо обробки високочастотним механічним впливом (HFMI – high-frequency mechanical impact) для покращення втомної міцності зварних з'єднань. З моменту опублікування рекомендацій HFMI було опубліковано чимало досліджень із значною кількістю нових даних про тест на виснаження, присвячених різним аспектам поліпшення; вплив міцності вихідного матеріалу, ефекту навантаження та товщини. Аналіз показує, що рекомендоване поліпшення класів втоми на основі міцності вихідного матеріалу добре застосовується. Крім того, добре розглядається зниження класів втоми для вищих коефіцієнтів R до визначеного значення $R = 0,52$. Нарешті, практичність коефіцієнта корекції товщини також підтверджується, ведучи до консервативної оцінки втоми. Показано, що відношення статистично оціненого класу FAT до рекомендованого значення є консервативним зі значенням вище одного майже для кожного набору даних; однак, навіть у деяких незначних випадках цей коефіцієнт є нижчим за одиницю, кожна окрема точка тесту в цьому дослідженні оцінюється консервативно, підтверджуючи придатність цієї рекомендації.

Моделювання наповнювача на основі Ti при вакуумній пайці сплаву TA 15. *Yongjuan Jing, Huaping Xiong, Yonglai Shang & Yaoyong Cheng*, pp. 1261-1268

Була створена модель для чотириелементного матеріалу зі структурою HCP EET. Проаналізували за моделлю наповнювач TiZrCuNi. Було встановлено, що елемент Ni корисний для міцності наповнювача, але елемент Cu сприятливий для пластичності наповнювача. Це показало, що важ-

ливо контролювати кількість Cu та Ni при правильному розподілі їх. Порівняно з наповнювачем Ti-13Zr-22Cu-9Ni, мас.%, розроблено наповнювач Ti-(10 ~ 11) Zr-(10 ~ 12) Cu-(9 ~ 10) Ni, мас.%. При зниженні в ньому кількості Cu та Ni до 19 мас.% також має міцну міцність і хорошу пластичність. Сплав ТА 15 методом вакуумного паяння з'єднували з призначеним металом наповнювача – Ti- (10 - 11) Zr- (10 ~ 12) Cu- (9 ~ 10) Ni, мас.%. Була досягнута однорідна мікроструктура Widmanstätten, яка характерна для високої міцності з'єднань.

Про викривлення консольних балок з порожнистим перерізом. *Timo Björk, Antti Ahola & Tuomas Skriko*, pp.1269-1278

У цьому документі розглядається аналіз напруженості балки консольної коробки, підданої статичному або коливальному навантаженню крутного моменту. Такі балки можуть мати декілька критичних місць з точки зору міцності; однією цікавою деталлю є переріз, де накладається навантаження. Однак такі деталі, як правило, можуть бути розроблені для отримання гладких форм, що призводить до помірних концентрацій напруги, що означає, що можна уникнути збоїв втомі. Однак деформація поперечного перерізу індукуює поперечні напруги на згин, які можуть бути згубними, особливо у зварних балках коробки. Крім того, місце кріплення, де брус зазвичай приварюється до торцевої пластини, може стати критичною точкою. У цій роботі представлений аналітичний підхід для обчислення поздовжніх напружень за рахунок викривлення поперечного перерізу, а також викликаних спотвореннями поперечних та поздовжніх напружень у прямокутних порожнистих перерізах. Аналізи кінцевих елементів проводяться з метою перевірки аналітичного підходу до проливання світла на критичні точки деталей торцевої пластини з різним ступенем проникнення зварного шва, використовуючи концепцію ефективної напруги на зріз (МКЕ) та запропонування проектних пропозицій для ефективної конструкції, деталізації діафрагмових пластин для зменшення деформації.

Детальне дослідження клейового стрічково-трубчастого T-подібного з'єднання ламінованої композитної трубки FRP під осьовим стискаючим навантаженням. *Kundan Bharti, L.A. Kumaraswamidhas & R.R. Das*, pp. 1279-1292

Композитні конструкції мають широке застосування в механічних галузях. Такі конструкції складаються з декількох з'єднань, що може мати ризик зрештою послабити конструкцію у разі надмірної ваги. Тому необхідно зміцнювати структури, щоб зменшити ймовірність виходу з ладу. Це дослідження було проведено за моделлю трубчастого T-подібного з'єднання, що містить клейку стрічку. Робота також була зосереджена на тривимірному аналізі напруги на клейовій стрічці. Модель була виготовлена з ламінованих та армованих волокнами полімерних (FRP – fibre-reinforced

polymer) композитних труб з клейкою трикутною стрічкою, підданих осьовому стискаючому навантаженню. Моделювання та аналіз проводилися за допомогою методу кінцевих елементів (МКЕ) для трьох різних стиків з різними геометричними параметрами. Модель була підтверджена за допомогою результатів доступної кінцево-елементної моделі. На основі представлених результатів кінцево-елементної моделі, осьове напруження на перерізі опора-стрічка, кільцеве напруження та кільцево-осьове напруження при перетині хорди та стрічки виявили більший ефект порівняно з іншими компонентами напруження. Максимальне значення компоненти напруження було виявлено в області між опорою та хордою з'єднання, що з часом може спричинити руйнування. Вплив адгезійної стрічки на відхилення було детально вивчено за допомогою ANSYS 18.1. Результати показали, що відхилення моделі клейової стрічки можна зменшити на 12,36% у порівнянні з умовами без стрічки. На підставі отриманих результатів досліджень було встановлено, що наявність клейової стрічки значно зменшує ефект відхилення, а також покращує міцність з'єднання та стійкість конструкції.

В'язка міцність поперечних кріпильних сталевих з'єднань з одностороннім дуговим зварюванням із застосуванням зварювальних матеріалів з низькою температурою перетворення. *Takeshi Hanji, Kazuo Tateishi, Suguru Kano, Masaru Shimizu, Tadahisa Tsuyama & Toshio Takebuchi*, pp. 1293-1301

У цій роботі було досліджено застосування витратних матеріалів для дугового зварювання при низькій температурі перетворення (LTT – low transformation temperature) для поліпшення втомної міцності навідь при відмові від кореня зварного шва. Поперечні з'єднання, утворені одностороннім зварюванням, схожими на ребро-палубні з'єднання в ортотропних сталевих мостових колодах, виготовлялися за допомогою зварювального витратного матеріалу LTT і звичайного зварювального витратного матеріалу. Випробування на втомлюваність проводили з навантажувачів на згин поза площиною, використовуючи апарат для випробування на виснаження вібраційного типу. Результати випробувань показали, що в матеріалі з витратою LTT можна досягти більш високої втомної міцності порівняно зі звичайним. Крім того, залишкові напруги навколо зварного шару були уточнені за допомогою рентгенографічних вимірювань та аналізу кінцевих елементів. Результати виявили, що витратний метал зварювального металу LTT може зменшити залишкову напругу навколо зварного шва, а також ввести стиснене залишкове напруження в корінь зварного шва, що може сприяти поліпшенню втомної міцності.