

Зварні заготовки, які зварюються шляхом лазерного зварювання, є широко поширеним технічним рішенням в секторі обробки тиском сталевих листів, зокрема в автомобільній промисловості. Це дозволяє комбінувати в одній і тій самій заготовці кілька допоміжних заготовок різної товщини з різних марок сталей. Зазначене технічне рішення має багато переваг: на кожній ділянці заготовки використовуються оптимальні властивості матеріалів і оптимальна товщина, що дозволяє одержувати оптимальні експлуатаційні характеристики з точки зору безпеки, ваги, впливу на довкілля тощо. Крім того, це дозволяє проектувальникам комбінувати декілька деталей в одній. Також існує можливість максимального використання матеріалу, тим самим зменшуючи кількість відходів, витрати і вплив на довкілля. Таким чином, зварні заготовки, які зварюються шляхом лазерного зварювання, спрощують в цілому виробничий процес, підвищуючи безпеку пасажирів, забезпечуючи підвищення продуктивності, знижуючи витрати і скорочуючи викиди CO₂.

Поява нових марок сталей, які мають дуже високу міцність, і навіть дуже високу формовність, ставить нові завдання щодо виготовлення зварних заготовок, зварюваних шляхом лазерного зварювання. Фактично, марки сталей, які мають більш високу міцність і формовність, містять більше легуючих елементів, що веде до одержання нових властивостей і ефектів, і виникнення ризиків руйнування стосовних зварного шва. Це є особливо критичним у разі сталевих листів із гальванічним покриттям, тобто, оцинкованих сталевих листів. Фактично, цинкове покриття, що використовується для захисту від корозії, викликає рідкометалічне окрихчування (LME) під час операції зварювання.

Цей винахід спрямований на вирішення проблеми виготовлення зварних заготовок, які зварюються з допомогою лазерного зварювання, використовуючи оцинковані сталі з дуже високою міцністю так, щоб готові зварні заготовки, які зварюються шляхом лазерного зварювання, мали високу міцність і формовність, і щоб зварний шов не був слабким місцем конструкції готового виробу.

Завдання цього винаходу вирішується з допомогою способу стикового зварювання двох сталевих листів за п. 1 формули винаходу, які містять за потреби ознаки пп. 2-6 формули винаходу. Іншим предметом цього винаходу є зварювана шляхом лазерного зварювання зварна заготовка за п. 7, яка містить за потреби ознаки за п. 8 формули винаходу. Іншим предметом цього винаходу є формована деталь за п. 9 формули винаходу.

Нижче наведений опис винаходу з посиланням на додані креслення:

Фіг. 1А це схематичний вид операції стикового зварювання з допомогою лазерного джерела;

Фіг. 2А це спосіб із існуючого рівня техніки для випробування зварних складальних одиниць;

Фіг. 2В це новий розроблений спосіб випробування зварних складальних одиниць;

Фіг. 3А і 3В це види у перерізі двох можливих варіантів виконання підготовки сталевих листів перед стиковим зварюванням за винаходом;

Фіг. 4 це види у перерізі зварної складальної одиниці, виготовленої за винаходом.

У наведеному нижче описі фігури і формула винаходу, орієнтації і просторові прив'язки представлені з посиланням на координати X, Y, Z, де Z - це вертикальний напрямок, перпендикулярний лицьовій і задній поверхням зварюваних сталевих листів, а X і Y визначають площину лицьової і задньої поверхонь сталевих листів. Це стосується кожної фігури. Коли фігура є двовимірною, вісь, яка розташована поза фігурою, позначена точкою в колі, якщо вона спрямована до читача, і хрестиком в колі, коли вона спрямована від читача згідно із загальноприйнятими правилами.

Терміни, які вказують на розташування і напрямок "верх", "вгору", "верхній", "над", "нижній", "нижчий", "під" тощо, визначаються за вертикальним напрямком Z. Терміни, які вказують на розташування і напрямок "передній" і "задній" визначаються за напрямом X, а більш конкретно за напрямом W зварювання, який паралельний осі X, як показано на фігурах. Терміни "передній" або "нижче за ходом" означають "в напрямку W", терміни "задній" або "вище за ходом" означають "проти напрямку W".

Напрямок "за шириною" або "поперечний" напрямок відноситься до орієнтації, паралельній осі Y.

Сталевий лист є плоским листом зі сталі. Він має лицьову і задню поверхні, які також називаються верхньою і нижньою сторонами або верхньою і нижньою поверхнями. Відстань між зазначеними поверхнями називається товщиною листа. Товщина може вимірюватися, наприклад, мікрометром, мікрогвинт і п'яту якого поміщають на лицьову і задню поверхні. Подібним чином може бути виміряна товщина формованої частини. Товщина сталевих листів в цьому винаході, наприклад, становить 0,5-5,0 мм, переважно, 0,5-4,0 мм, а більш переважно 0,5-3,5 мм.

Зварні складальні заготовки виготовляються шляхом складання одна з одною, наприклад, шляхом лазерного зварювання, декількох листів або вирізаних заготовок із сталі, відомих як допоміжні заготовки, з метою оптимізації експлуатаційних характеристик деталі на різних її ділянках, зниження загальної ваги деталі і зменшення загальної собівартості деталі.

Границя міцності на розтяг, границя плинності, подовження і рівномірне подовження вимірюються за стандартом ISO 6892-1, опублікованому у жовтні 2009 р. Зразки для випробування на розтяг вирізають з плоских ділянок. За необхідності для випробування на розтяг беруть зразки малого розміру з метою виконання випробування для всієї плоскої ділянки деталі.

Твердість є величиною опору місцевій пластичній деформації, створюваній шляхом механічного вдавлювання. Вона знаходиться у певному співвідношенні з механічними властивостями матеріалу і її вимірювання є важливим способом локального вимірювання, який не потребує вирізання зразка для випробування на розтяг. В цьому винаході вимірювання твердості виконують з допомогою індентора Віккерса за стандартом ISO 6507-1. Твердість за Віккерсом виражається в одиницях HV.

Як показано на Фіг. 1, стикове зварювання є операцією зварювання певного типу, в якій два сталеві листи 1, 2 розміщують поряд один з одним вздовж відповідних кромок E1 і E2 і виконують зварний шов 3 шляхом розплавлення відповідних кромок E1 і E2 і утворення зварювальної ванни, яка містить суміш матеріалів сталевих листів і можливого зовнішнього матеріалу, який використовується для підтримки процесу зварювання. Потім зварювальна ванна твердне з утворенням зварного шва 3. На Фіг. 1 показаний випадок лазерного стикового зварювання, в якому як джерело енергії для утворення зварювальної ванни використовується лазер 10, який випускає лазерний промінь 11. Кромки під зварний шов можуть мати прямолінійну або криволінійну обробку. Під час операції зварювання сталеві листи, які підлягають зварюванню, і джерело енергії, яке використовується для розплавлення сталевих листів, переміщуються один відносно одного в напрямку W зі швидкістю, відомою як швидкість зварювання. В конкретному варіанті виконання між сталевими листами 1, може бути залишений зазор 4. Це дозволяє, наприклад, вводити в зварювальну ванну значну кількість додаткового матеріалу, такого як присадний дріт без надмірного збільшення товщини зварного шва. Така надмірна товщина вважається геометричним дефектом і може негативно впливати на подальшу обробку зварної заготовки, наприклад, вона може негативно впливати на операцію штампування.

Лазерне зварювання є операцією зварювання, в якій для подачі енергії, необхідної для розплавлення зварних листів, використовується щонайменше лазерне джерело. В конкретних варіантах виконання подачі енергії для забезпечення зварювання з лазерним джерелом можуть бути пов'язані інші джерела енергії, такі як-от електрична дуга, нагрівання інфрачервоними променями тощо.

Лазерне зварювання генерує тепло в зварюваних сталевих листах 1, 2 поблизу їх кромок E1, E2. Зона сталевих листів 1, 2 в якій тепло, яке генерується під час зварювального процесу, зумовлює підвищення температури, відома як зона термічного впливу. Ізотерми певної температури в зоні термічного впливу позначають точки сталевих листів, в яких максимальна досяжна температура є зазначеною певною температурою. Наприклад, ізотерма 400 °C в зоні термічного впливу листа 1 позначає всі точки сталевих листів поряд з кромкою E1, в яких максимальна температура, досягнута під час операції зварювання, становила 400 °C. З логічного погляду будь-яка точка, яка знаходиться ближче до кромки E1 ізотерми 400 °C, під час процесу зварювання досягатиме температури вище 400 °C, і навпаки, будь-яка точка, яка знаходиться далі від кромки E1, під час процесу зварювання досягатиме температури нижче 400 °C.

Якість зварного шва з точки зору геометричних дефектів визначається за Європейським стандартом EN 10359:2015, під назвою "Зварні складові заготовки, одержувані лазерним зварюванням - технічні умови постачання".

Цей винахід відноситься до зварювання сталевих листів, з яких щонайменше один має цинкове покриття щонайменше на одній стороні. Під цинковим покриттям слід розуміти покриття, що має хімічний склад, який містить щонайменше 80 % мас. цинку. Наприклад, цинкові покриття включають такі типи відомих цинкових покриттів (перелік не обмежується ними):

- покриття з чистого цинку, яке наноситься шляхом електролітичного осадження;
- покриття із чистого цинку, яке наноситься шляхом гарячого цинкування зануренням;
- покриття цинк/залізо, яке наноситься шляхом гарячого цинкування зануренням, після якого безпосередньо виконується етап легування між сталевим листом і цинковим покриттям для збільшення вмісту заліза в покритті приблизно до 8-12 % мас.;
- цинк-алюміній-магнієві покриття, яке містить у % мас. 1-6 % алюмінію, 0,5-5 % магнію, решта Zn.

В наведеному нижче описі і формулі винаходу цинкове покриття відрізняється товщиною. Товщину цинкового покриття можна виміряти за допомоги стандартизованих способів, таких як-от спосіб, описаний в стандарті ISO 1463 "Металеві і оксидні покриття - Вимірювання товщини покриття - Мікроскопічний метод". Для того, щоб чітко відрізнити металеве покриття від підкладки, можна використовувати травлення нітратом, як описано в пункті 1 додатка C вищезгаданого стандарту.

На Фіг. 2A показане виконання оцінки міцності зварного шва, виходячи з сучасного стану техніки. Готують зразок для випробувань на розтяг, в якому зварний шов 3, який з'єднує два сталевих листи 1 і 2, розташований посередині зразка у поперечному напрямку порівнюють з розтягувальним зусиллям F. Цей добре розроблений спосіб дозволяє одержувати об'єктивну оцінку відносної міцності різних елементів, які складають зразки, тобто, два сталеві листи 1, 2 і зварний шов 3. За зазначеним способом зварний шов вважається достатньо міцним, якщо зразок руйнується зовні зварного шва. Іншими словами, зварний шов вважається хорошої якості, якщо він щонайменше міцніший за найслабший із двох сталевих листів, тобто зварний шов не є слабкою ланкою складальної одиниці.

Незважаючи на те, що вищеописаний спосіб дозволяє одержувати об'єктивну оцінку суто механічної міцності зварного шва, він фактично не відображає різних фактичних режимів деформацій, впливу яких піддається зварний шов в реальних умовах. Під час штампування звареної заготовки, одержаної лазерним зварюванням, зварний шов піддається деформаціям у всіх напрямках, а не лише у поперечному напрямку.

Автори винаходу встановили, що при лазерному зварюванні сталевих листів щонайменше в одному з них, в тому що має більш високу міцність, наприклад, границя міцності на розтяг вище 590 МПа, можуть виникати невеликі тріщини, перпендикулярні зварному шву, на ділянках, де зварний шов піддається деформаціям, які мають поздовжню складову. Як не дивно, тріщини цього типу спостерігаються лише в листах із високою міцністю, а не в листах низьких марок. Ризик виникнення тріщин зазначеного типу не можна оцінити, використовуючи вищеописаний спосіб, оскільки поведінка зварного шва, який деформується у поздовжньому напрямку, не піддається перевірці при виконанні традиційного способу випробування. З іншого боку, існує статистичний елемент, пов'язаний з утворенням тріщин зазначеного типу. Стосовно однієї і тієї самої геометрії деталі, що містить одні і ті самі марки сталі, і одним і тим самим параметрам лазерного зварювання в деяких деталях тріщини можуть бути відсутніми, в той час як в інших деталях можуть утворюватися невеликі тріщини. Це пов'язано з природними коливаннями в складі сталевих листів, процесі зварювання, процесі штампування тощо. Отже, зазначені невеликі тріщини не є цілком прогнозованими, що створює додаткові проблеми у промисловому виробництві, оскільки такі тріщини складно виявляти при контролі якості. Незважаючи на те, що зазначені тріщини у формованій деталі можуть бути обмеженого розміру, вони неминуче послаблюють деталь і ведуть до її руйнування в процесі експлуатації, створюючи серйозні проблеми безпеки.

Тому автори винаходу розробили нову методологію оцінки ризику виникнення зазначених невеликих тріщин. Автори винаходу встановили, що при виконанні зварного шва у поздовжньому напрямку зразка для випробування на розтяг, паралельному розтягувальному зусиллю, як показано на Фіг. 2В, існує можливість спостереження присутності невеликих поперечних тріщин у зварних складальних одиницях, одержаних лазерним зварюванням і які містять щонайменше одну заготовку з високоміцної сталі. Крім того, автори винаходу встановили, що хорошим критерієм, який дозволяє переконатися в малій ймовірності утворення невеликих тріщин у серійному виробництві, є виконання серії з 20 випробувань на розтяг зразків, зварених у поздовжньому напрямку, і порівняння рівномірного відношення подовження звареної складальної одиниці із середнім зважуванням відносного подовження кожного зі сталевих листів. Автори винаходу встановили, що ризик утворення тріщин є дуже низьким, якщо рівномірне відносне подовження U_{weld} зварної складальної одиниці становить щонайменше 50 % величини середнього зваженого $(Usheet1*th1+Usheet2*th2)/(th1+th2)$ для всіх 20 виконаних випробувань на розтяг, де $th1$ і $th2$ - товщини сталевих листів 1, 2 і $Usheet1$ і $Usheet2$ це - їх відповідні рівномірні відносні подовження.

В решті опису, коли U_{weld} менше $(Usheet1*th1+Usheet2*th2)/(th1+th2)$, руйнування зразка для випробування на розтяг буде розглядатися як крихке руйнування, а, з іншого боку, якщо U_{weld} більше зазначеного середнього зваженого, руйнування зразка для випробування на розтяг розглядатиметься як пластичне руйнування.

Завдяки вищеописаному новому розробленому статистичному випробуванню поздовжніх зварних швів, автори винаходу змогли дослідити проблему утворення невеликих тріщин на великій кількості сталевих листів з цинковим покриттям.

Автори винаходу змогли встановити, що ризик утворення невеликих тріщин в зварних складальних одиницях, які містять щонайменше один оцинкований сталевий лист, присутній, коли вміст С в зазначеному сталевому листі % мас. перевищує 0,15 % і/або коли вміст Si перевищує 0,5 %. Цей винахід відноситься до лазерного зварювання оцинкованих сталевих листів, з яких щонайменше один сталевий лист має хімічний склад, що містить щонайменше С у кількості 0,15 % мас. або Si у кількості 0,5 % мас. або обидва зазначені елементи в зазначеній кількості. Для спрощення опису приймається, що далі в описі щонайменше сталевий лист 1 має саме такий хімічний склад.

Невеликі тріщини з'являються поблизу зварного шва в зоні термічного впливу або в зварному шві. Це вказує на проблему LME, яка відноситься до комбінації певних складів і мікроструктур високоміцних сталей, і пов'язана з присутністю цинку, який стає рідким під впливом тепла, що генерується під час операції зварювання. Фактично виникнення LME при лазерному стиковому зварюванні є несподіваним, оскільки відомо, що LME виникає з комбінації таких трьох факторів, один з яких не має мати місця у випадку лазерного стикового зварювання:

- склад сталевих листів має високий вміст Si і/або С, що фактично має місце щодо вищеописаних високоміцних сталей;
- присутність рідкого металу, зокрема рідкого цинку, що фактично може мати місце, коли цинк розплавляється при температурі вище 420 °C під дією тепла, яке генерується лазерним променем;
- наявність залишкових напружень, що, з іншого боку, мабуть, не має мати місця при лазерному стиковому зварюванні, оскільки ця технологія не передбачає генерування механічних напружень в

зварному шві на відміну, наприклад, від точкового зварювання, при якому до зварного шва прикладається певне зусилля.

В силу вищесказаного автори винаходу несподівано виявили, що тріщини LME-типу утворюються в зварювальних складальних одиницях з високоміцних оцинкованих сталей, зварених шляхом лазерного зварювання. Можливо, що залишкові напруження, які зумовлюють виникнення LME, походять від теплової деформації і деформації, зумовленої фазовим перетворенням в заготовках після операції зварювання.

Знаючи, що LME фактично може виникати при лазерному зварюванні високоміцних оцинкованих сталей, автори винаходу спробували використовувати нову розроблену технологію статистичних випробувань поздовжніх зварних швів для підтримки розробки контрзаходів щодо виникнення LME.

Автори винаходу зробили спробу видалення цинкового покриття поблизу зварного шва для усунення тріщиноутворення, яке зумовлюється LME. Для видалення цинкового покриття можуть застосовуватись кілька можливих способів. Для видалення цинкового покриття поверхня листів може зазнавати механічної зачистки. Для абляції цинкового покриття можна використовувати імпульсний лазерний промінь. Автори винаходу несподівано встановили, що необов'язково повністю видаляти цинкове покриття поблизу зварного шва для повного усунення виникнення тріщин, зумовленого LME. Фактично автори встановили, що як тільки товщина цинкового покриття не перевищує 3,5 мкм виключається ризик виникнення LME.

З посиланням на Фіг. 3А сталевий лист 1 складається з підкладки 12, покритої цинковим покриттям 5, яке має товщину Zn-покриття Zn_{th} , виражену в мкм. Слід зазначити, що для спрощення фігури посилання на покриття надається на лицьовій стороні сталевго листа 1. Те саме стосується всіх інших сторін сталевих листів 1 і 2, тобто, задньої сторони листа 1 і верхньої і нижньої сторін листа 2. Фактично, важливим є використання і впровадження цього винаходу шляхом видалення щонайменше частини цинкового покриття на всіх сторонах, де товщина цинкового покриття більше 3,5 мкм, і те, що підкладка 12 сталевго листа має хімічний склад, що містить С у % мас. більше 0,15 % або Si більше 0,5 % або обидва зазначені елементи у зазначеній кількості.

Цинкове покриття 5 щонайменше частково видаляють по ширині $Wabini$ (початкова ширина абляції), створюючи тим самим зону 6 абляції. Товщина покриття в зоні абляції 6 позначена як $Znab$ (товщина покриття в зоні абляції). Слід зазначити, що товщина покриття в зоні абляції стосується максимальної ширини в зоні абляції. Якщо в результаті процесу абляції в зоні 6 абляції залишається нерівномірна товщина покриття, то $Znab$ відповідає середній величині Zn в зоні абляції, яка вимірюється з допомогою мікроскопічного дослідження перерізу.

Як пояснюється вище, автори винаходу встановили, що для забезпечення відсутності LME необхідно стежити за тим, щоб товщина $Znab$ в зоні абляції була менше 3,5 мкм.

Далі наводиться опис із посиланням на Фіг. 4, на якій переріз зварної заготовки 7, звареної шляхом лазерного зварювання складається зі сталевих листів 1 і 2, а також зварного шва 3.

Зона абляції після зварювання 8 має меншу ширину $Wabfin$ (кінцева ширина абляції), ніж ширина $Wabini$ зони абляції перед зварюванням 8. Фактично частина кромки E1 сталевго листа 1 була впроваджена за допомоги розплавлення в зварний шов 3 і відповідна частина зони абляції перед зварюванням 8 також була впроваджена в зварний шов 3.

З урахуванням того, що температура плавлення цинку дорівнює 420 °C і, що LME може виникати лише за присутності рідкого Zn, LME є потенційною проблемою щодо зварної заготовки 7, яка зварюється шляхом лазерного зварювання, в зоні термічного впливу на ділянках, які досягають температури поверхні вище 420 °C. Автори винаходу встановили, що при лазерному зварюванні розташування ізотерми 420 °C на поверхні сталевих листів завжди знаходиться в межах відстані 0,2-0,5 мм від зварного шва. Отже, для запобігання виникненню LME необхідно, щоб $Wabfin$ дорівнювала або перевищувала 0,5 мм.

На закінчення необхідно відзначити, що для перешкоджання виникненню LME необхідно зменшити товщину Zn-покриття поблизу кромки до товщини $Znab$ менше 3,5 мкм по ширині $Wabini$, так щоб ширина зони абляції $Wabfin$ після зварювання перевищувала 0,5 мм. Знаючи кількість матеріалу, який розплавляється біля кромки E1, фахівець може визначити необхідну ширину $Wabini$ на сталевому листі 1 перед зварюванням.

Отже, існує можливість одержання зварної заготовки, що зварюється шляхом лазерного зварювання, без LME поблизу зварного шва 3, яка містить перший і другий сталеві листи 1 і 2, кожен з яких містить підкладку 12, причому щонайменше один із сталевих листів має металеве покриття 5 на основі цинку щонайменше на одній стороні, і всі сторони, які мають товщину Zn_{th} металевго покриття на основі цинку більше 3,5 мкм, і підкладка 12 сталевго листа з вмістом вуглецю вище 0,15 % мас. або вмістом кремнію вище 0,5 % мас. або містить обидва зазначені елементи у зазначеній кількості, мають зону абляції після зварювання 8, яка має товщину $Znab$ металевго покриття на основі цинку після абляції, яка не перевищує 3,5 мкм і ширину $Wabfin$ зони абляції після зварювання не менше 0,5 мм.

Також існує можливість виготовлення деталей у вигляді формування вищеописаної зварної заготовки, що виготовляється шляхом лазерного зварювання, без ризику утворення LME-тріщин поблизу зварного шва. Наприклад, зварювальна заготовка, що виготовляється шляхом лазерного зварювання, може використовуватися для виготовлення деталі шляхом холодного штампування або гарячого штампування.

В конкретному варіанті виконання абляція цинкового покриття виконується з допомогою абразивних щіток, які обертаються на сталевому листі для видалення щонайменше частини покриття. Наприклад, щітки виготовляють із полімерного полотна, наповненого твердими керамічними частинками, наприклад, з оксидів алюмінію або карбідів кремнію. В цьому випадку критичними параметрами для зачистки є абразивність щітки, зусилля, що прикладається щіткою до покриття, і швидкість, з якою щітка переміщається біля поверхні. Залежно від матеріалу і цинкового покриття необхідно відрегулювати зазначені параметри для одержання необхідної товщини $Z_{\text{наб}}$ після абляції. Також є можливість виконання кількох проходів під час зачистки для видалення більшого покриття.

В конкретному варіанті виконання абляція виконується з допомогою імпульсного променя лазера. Автори винаходу встановили, що взаємодія імпульсних лазерних променів і покриття зумовлює випаровування і витискання щонайменше частини покриття з поверхні сталевго листа. Наприклад, може використовуватися потужність лазера 400-1500 Вт із частотою імпульсів 5-15 кГц і швидкістю абляції 2-15 м/хв.

В конкретному варіанті виконання, показаному на Фіг. 3В, зона 6 абляції на сталевому листі перед зварюванням не починається праворуч біля кромки E1 сталевго листа. Натомість передбачена зона 9 зміщення, яка має ширину Woffset, на якій абляцію не виконують. Тобто, товщина покриття в зоні 9 зміщення є такою самою, як і у основної маси матеріалу, тобто Z_{nth} . Автори винаходу встановили, що наявність такого зміщення не веде до LME-тріщиноутворення за умови, що вся зона зміщення 9 розплавляється і впроваджується в зварний шов 3, і за умови, що Wabfin залишається перевищує 0,5 мм. Було встановлено, що в зварному шві не виникає LME, навіть якщо в зварний шов впроваджується деяка кількість цинку з металевго покриття. Якщо зміщення присутнє перед зварюванням і вся зона 9 зміщення впроваджується в зварювальну ванну, зона абляції після зварювання 8 матиме такі самі характеристики, як і якщо зміщення відсутнє, як показано на Фіг. 4. Присутність такого зміщення має перевагу, яка полягає в тому, що воно може забезпечувати кращий захист від корозії кромки E1 перед зварюванням. Фактично завдяки тому, що цинковий захист від корозії є катодним захистом, цинкове покриття в зоні 9 зміщення забезпечує захист відкритих частин кромки E1 без покриття.

В конкретному варіанті виконання щонайменше один із сталевих листів 1, 2 піддається етапу зневуглицювання для зменшення вмісту вуглецю у зазначеному сталевому листі поблизу поверхні зазначеного сталевго листа. Зазначений етап зневуглицювання виконується перед нанесенням цинкового покриття. Наприклад, етап зневуглицювання виконується в печі, яка використовується для відпалу сталевго листа перед нанесенням на нього покриття. Наприклад, етап зневуглицювання виконується шляхом регулювання точки роси в зазначеній печі для відпалу до величини, що не нижче -10°C. Як перевага завдяки використанню сталевго листа, який має низький вміст вуглецю поблизу поверхні, зменшується ризик виникнення LME. Наприклад, вміст вуглецю на глибині 20 мкм від поверхні сталевго листа з кожної сторони становить менше 0,15 % мас., переважно менше 0,10 % мас. і вміст вуглецю в сталевому листі в центрі зазначеного сталевго листа (наприклад, вміст вуглецю, який вимірюється в смузі ± 100 мкм від середини товщини сталевго листа) перевищує 0,15 % мас.

В конкретному варіанті виконання етап абляції виконується так, що залишкова товщина $Z_{\text{наб}}$ перевищує 0,5 мкм, а більш переважно перевищує 1,0 мкм. Як пояснюється вище, автори винаходу встановили, що ризик виникнення LME відсутній, навіть якщо в зоні 6 абляції залишилася невелика кількість цинку, за умови, що $Z_{\text{наб}}$ менше 3,5 мкм. Як перевага, деяка кількість цинку, яка залишилася в зоні 6 абляції, може забезпечити деякий ступінь захисту від корозії сталевго листа, підданого абляції, перед зварюванням. Завдяки тому, що цинкове покриття є катодним захистом, цей захист від корозії поширюється на відкриті ділянки кромки без покриття на сторонах сталевих листів. Крім того, застосування процесу абляції, в результаті якого в зоні 6 абляції залишається деяка кількість цинкового покриття, означає відсутність ризику видалення (шляхом зачищення щітками) або розплавлення (шляхом лазерної абляції) розташованої нижче підкладки 12 сталевго листа нижче зони 6 абляції. Це цікаво, оскільки абляція самої підкладки 12 нижче покриття послабило б зварну заготовку, виготовлену шляхом лазерного зварювання, через утворення локальних дефектів геометричного характеру або локальної недостатньої товщини.

В конкретному варіанті виконання процес лазерного зварювання виконується через 1 хв після виконання процесу абляції, переважно навіть менш ніж через 30 с. Наприклад, процес абляції і процес зварювання виконуються на тому самому пристрої, який має оснастку для виконання етапу абляції і етапу зварювання. Наприклад, процес абляції і зварювання виконуються після однієї і тієї самої операції кріплення, тобто, сталеві листи 1, 2 фіксуються для утримання на місці для виконання етапу

абляції, і та сама фіксація для утримування на місці використовується для виконання процесу зварювання. Як перевага, завдяки швидкій послідовності виконання абляції і зварювання, можливо навіть після однієї і тієї самої операції кріплення, підвищується продуктивність, зменшується кількість етапів завантаження/розвантаження матеріалів, а також зменшуються ризики корозії в результаті етапу абляції.

В конкретному варіанті виконання процес абляції виконується не безпосередньо на кромці сталевго листа, а посередині сталевго листа, причому зазначений сталевий лист надалі ріжуть на ділянки, на якій виконувався процес абляції, так щоб зона абляції була розташована на кромці відрізаного зразка (можливо зі зміщенням).

В конкретному варіанті виконання характеристики щонайменше одного зі зварюваних сталевих листів стосовно хімічного складу, мікроструктури і механічних властивостей відповідають одному зі стовпчиків наведеної нижче таблиці (хімічний склад виражається в % мас., решта це Fe і немінучі домішки в результаті процесу виробництва, % залишкового аустеніту в мікроструктурі сталевго листа виражається в % поверхні перерізу, YP позначає границю плинності, виражену в МПа, UTS позначає границю міцності на розтяг, виражену в МПа, EI% це подовження, виміряне за вищезгаданим стандартом ISO 6892):

C%	Mn %	Si %	Al %	Cr %	Nb%	YP	UTS	EI%
0,11-0,15	1,1-1,8	0,5-0,9	<0,05			330-440	590-700	≥26 %
0,13-0,18	1,1-1,8	0,5-0,9	0,6-1			330-440	590-700	≥26 %
0,13-0,18	1,1-1,8	0,5-0,9	0,6-1			440-550	780-9000	≥18 %
0,15-0,25	2-2,8	0-0,4	0,2-1,2	0,01-0,5		700-850	980-1130	≥13 %
0,1-0,5	1-3,4	0,5-2,5	0,03-1,5	0,05-1		600-750	980-1130	≥19 %
0,15-0,23	1,4-2,6	0,6-1,5	0,02-1	<0,3	<0,035	600-750	980-1130	≥19 %
0,18-0,25	1,5-2,5	0,9-1,8	0,02-1	0,1-0,4	0,01-0,035	600-750	980-1130	≥19 %
0,15-0,25	1,8-3	1,2-2	<0,1	<0,5		700-820	1050-1180	≥14 %
0,19-0,24	1,5-2,5	1,2-2	0,01-0,06	0,2-0,5		850-1080	1180-1330	≥13 %
0,13-0,22	2,4-3	1,2-2,3	0,02-1		<0,05	850-1080	1180-1330	≥13 %
0,13-0,22	2,4-3	1,2-2,3	0,02-1		< 0,05	850-1080	1180-1330	≥13 %

Далі винахід буде описаний з посиланням на наведені нижче приклади, які жодним чином не є обмежувальними.

В таблиці 1 наведено хімічний склад використаного сталевго листа.

Таблиця 1

Хімічний склад сталевго листа у % мас.

C %	Mn %	P %	S %	Si %	Cu %	Ni %	Cr %	Al %	Mo %	V %	Nb %	B %	Ti %
0,22	1,96	0,0045	0,0013	1,12	0,01	0,01	0,19	0,56	0,004	0,004	0,032	0,0004	0,007

Вміст Si більше 0,5 % і вміст вуглецю більше 0,15 % є критичним для сталевго листа з погляду ризику виникнення LME під час зварювання у присутності цинкового покриття. Перед нанесенням покриття з чистого цинку шляхом гарячого занурення сталевий лист був знеуглецьований, так щоб вміст вуглецю, виміряний на відстані 20 мкм від поверхні сталевго листа з допомогою оптичної емісійної спектроскопії тліючого розряду (GDOES), складав 0,05 % мас.

Вихідна товщина покриття сталевго листа становила 7-11 мкм залежно від зразка (фактично, товщина покриття може мати відхилення при використанні сталевих листів, які виготовляються промисловим способом, через природні зміни параметрів на виробничих лініях).

Сталеві листи мали товщину 1,0 мм. Для аналізованих випробувань були виготовлені однотипні складальні одиниці з тих самих сталевих листів, які мають однакову товщину (іншими словами, характеристики сталевго листа 1 і сталевго листа 2 були однаковими).

В таблиці 2 перераховані використані параметри процесу абляції.

Таблиця 2

Параметри процесу абляції

Зразок	Спосіб видалення Zn	Потужність лазера (Вт)	Частота імпульсів (кГц)	Швидкість лазера (м/хв)	Зусилля зачистки щітками (Н)	Швидкість зачистки щітками (м/хв)	Кількість проходів при зачистці щітками
R1	без абляції	-	-				
R2	лазер	200	12	10			
R3	лазер	350	12	10			
R4	лазер	500	12	10			
I1	лазер	490	10	2			
I2	лазер	490	10	2			
I3	лазер	900	12	8			
I4	механічний	-	-		30	2,5	3
I5	механічний	-	-		20	2,5	1
I6	механічний	-	-		20	5	1
I7	механічний	-	-		30	2,5	1
I8	механічний	-	-		10	2,5	1
I9	механічний	-	-		10	5	1

Позначення зразків, виготовлених згідно з процесом винаходу, починаються з символу I, а позначення зразків, які не відповідають процесу винаходу, починаються з символу R. Абляція Zn-покриття виконувалася або з допомогою імпульсного лазера низької потужності або шляхом механічної зачистки щітками.

Механічна зачистка щітками виконувалася з допомогою встановлених на роботі щіток 3M Scotch-Brite "Deburr and Finish pro 4C MED+" діаметром 76,2 мм, шириною 12,7 мм з частотою обертання 6000 об/хв. Швидкість зачистки щітками відповідала швидкості, з якою роботизована рука переміщалася вздовж листа, який підлягає зачистці щітками.

В таблиці 3 наведені параметри для зони абляції перед зварюванням 6 після зварювання 8, а також результати механічних випробувань зварних швів.

Таблиця 3

Характеристики зон абляції і властивості зварних швів

Зразок	Znab (мкм)	Wabini (мм)	Woffset (мм)	Wabfin (мм)	Виникнення LME % крихкої руйнації з 20 зразків для випробувань, зварених у поздовжньому напрямку	
R1	<u>9,7</u>	0	0	0	так	40 %
R2	<u>7,6</u>	1,2	0	0,7	так	5 %
R3	<u>9,1</u>	1,2	0	0,7	так	10 %
R4	<u>8,3</u>	1,2	0	0,7	так	5 %
I1	0,1	1,3	0	0,8	ні	0 %
I2	0,1	0,9	0,3	0,6	ні	0 %
I3	0,1	1,2	0	0,7	ні	0 %
I4	0,1	6,4	0	5,8	ні	0 %
I5	0,2	6,4	0	5,8	ні	0 %
I6	0,5	6,4	0	5,8	ні	0 %
I7	0,5	6,4	0	5,8	ні	0 %

18	0,6	6,4	0	5,8	ні	0 %
19	3,2	6,4	0	5,8	ні	0 %

Підкреслені значення означають характеристики, які не відповідають винаходу стосовно контрольних зразків.

Зразок R1 не піддавався абляції і служив як порівняльний зразок, що представляє дуже низькі механічні властивості зварної складальної одиниці, відносно якої не передбачали жодних контрзаходів, щоб уникнути виникнення LME. Сорок відсотків (40 %) зразків для випробувань, зварених у поздовжньому напрямку згідно з новим способом випробувань показали незадовільний результат через утворення LME-тріщин.

Зразки з R2 по R4 були зразками, підданими абляції, але товщина цинку Znab, що залишився, після абляції була занадто високою для перешкодження виникненню LME.

Зразки з I1 по I9 показують технічний ефект винаходу. Завдяки видаленню цинку і одержанню товщини покриття менше 3,5 мкм на ширині неменше 0,5 мм після зварювання, запобігається виникнення LME, що дозволяє виготовляти складальні одиниці, які мають бездефектну конструкцію.

У разі зразка I2 була виконана абляція із зоною усунення 0,3 мм на кромках сталевих листів. Незважаючи на присутність на кромках сталевих листів зони без абляції, в готовій складальній одиниці була відсутня LME, оскільки вся зона зміщення була впроваджена в зварний шов, а ширина абляції після зварювання була більше 0,5 мм.

У випадку зразка I9 залишкова товщина покриття Znab після абляції становила 3,2 мкм. На готовій складальній одиниці не було помічено жодної абляції, незважаючи на присутність товщини цинкового покриття, що залишилася.

На завершення слід зазначити, що коли сталеві листи піддавали абляції перед зварюванням з одержанням зони абляції з товщиною Znab залишкового покриття, що була не менше 3,5 мкм, на ширині більше 0,5 мм в готовій зварювальній складальній одиниці, LME не виникала.

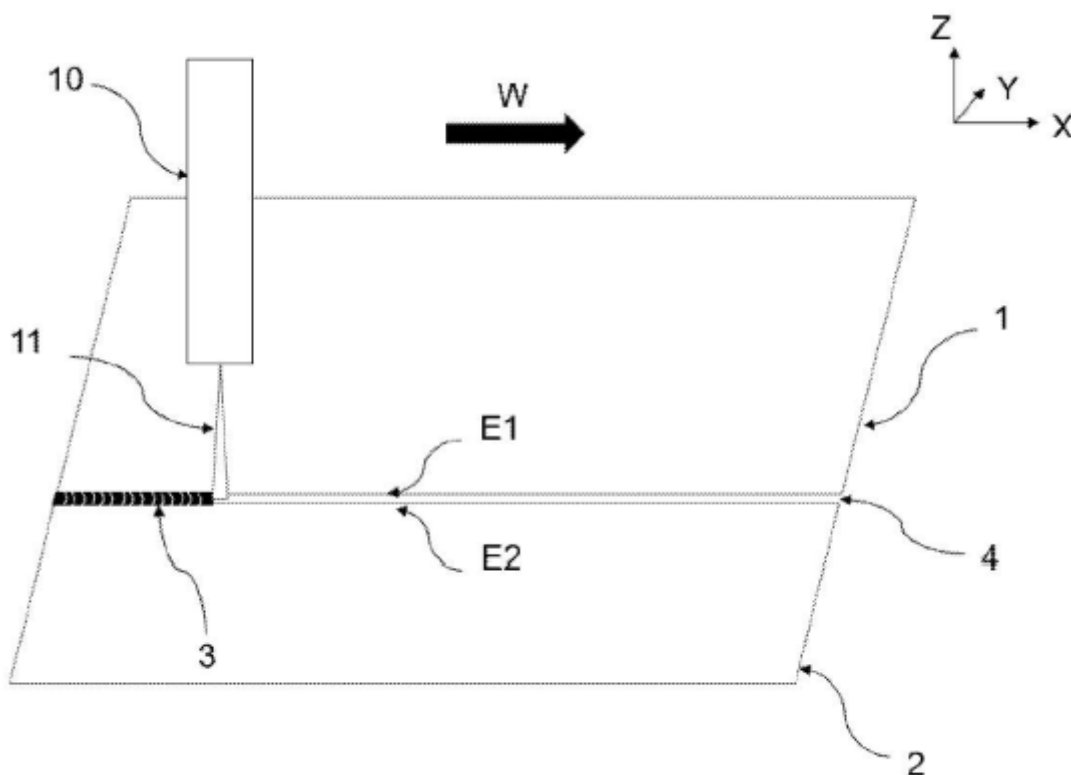
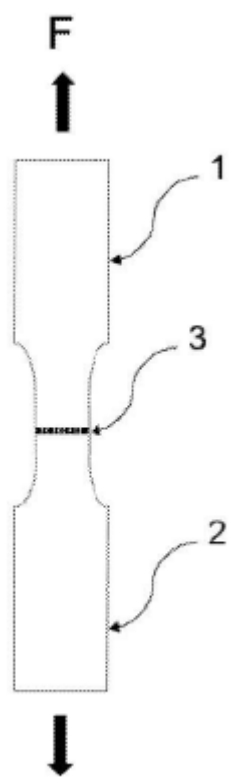
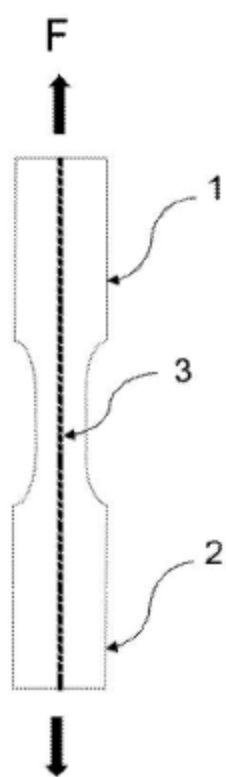


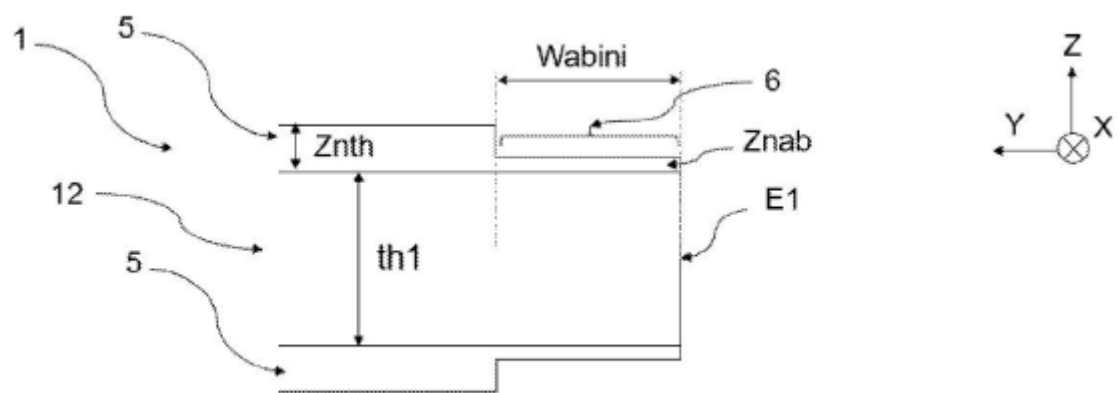
Fig. 1



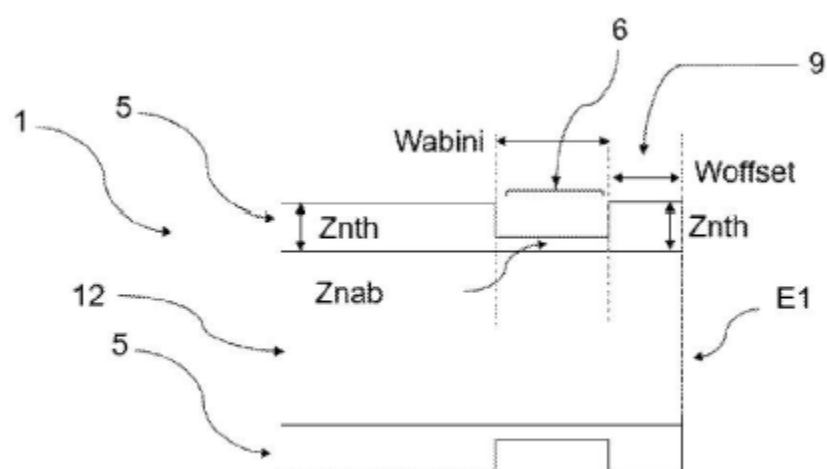
Φir. 2A



Φir. 2B



Φir. 3A



Φir. 3B

