

РАЗДЕЛ «СВАРОЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

УДК 612.791

НОСОВ Д.Г., инженер
ПЕРЕМІТЬКО В.В., к.т.н., доцент

Дніпродзержинський державний технічний університет

ПРО ВИКОРИСТАННЯ МАГНІТНИХ ПОЛІВ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ФОРМОУТВОРЮВАННЯМ ВАЛИКІВ ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ ТА НАПЛАВЛЕННІ

Виконано аналіз результатів експериментальних досліджень магнітних полів, що стосуються зварювального виробництва. Відмічено переваги і окремі специфічні недоліки, що впливають на стабільність наплавлення в магнітному полі. Показана можливість використання магнітного поля для керування геометричними параметрами валу, що наплавляється.

Выполнен анализ результатов экспериментальных исследований магнитных полей применительно к сварочному производству. Отмечены преимущества и отдельные специфические недостатки, влияющие на стабильность наплавки в магнитном поле. Показана возможность использования магнитного поля для управления геометрическими параметрами наплавляемого валика.

The analysis of results of experimental researches of the magnetic fields as it applies to welding production is executed in the article. Advantages and separate specific failings affecting stability of welding in the magnetic field are marked. Possibility of the use of the magnetic field for the management by the geometrical parameters of roller is shown.

Вступ. Автоматичне електродугове зварювання та наплавлення під шаром флюсу займає значну частку серед відомих способів зварювання та наплавлення, які використовують при виробництві/відновленні різноманітних конструкцій та виробів. Це пояснюється можливістю використання дротів збільшеного діаметру та високих струмів і, як наслідок, високою продуктивністю способу. Проте, інтенсифікація процесів розплавлення електродного та основного металу призводить до низки проблем, від рішення яких залежить якість об'єктів, що виготовляються. Підвищити ефективність процесів дугового зварювання та наплавлення можливо шляхом керування формоутворенням валика, застосовуючи нові технологічні прийоми.

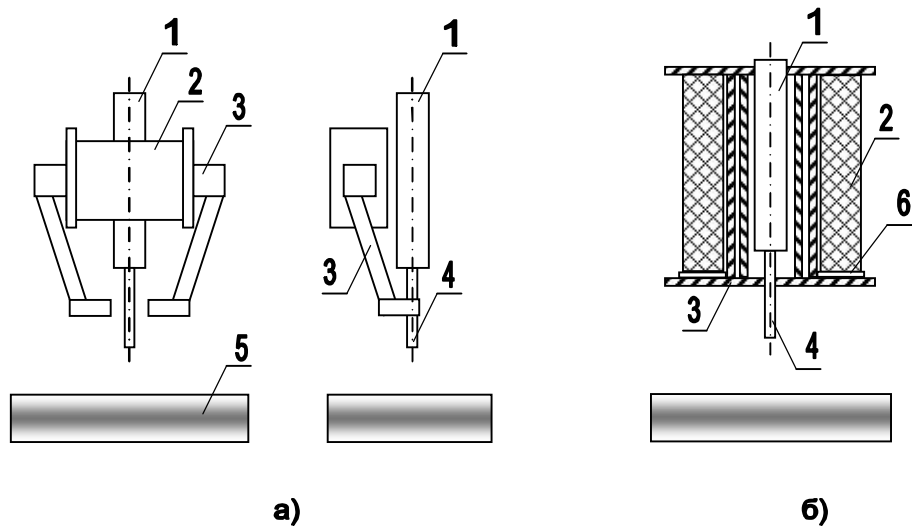
Якість формування валика і його розміри в поперечному перерізі визначаються параметрами режиму наплавлення та властивостями основних та зварювальних матеріалів.

Постановка задачі. При наплавленні з метою економії матеріалів, що мають відносно велику ціну, слід обмежувати долю основного металу, тобто керувати формоутворенням валика. Принципово нові можливості для керування формою та розмірами валиків при електродуговому зварюванні та наплавленні створюються при використанні зовнішніх магнітних полів. Крім того, магнітним полем можна керувати процесами кристалізації металу зварювальної ванни, впливати на електричну дугу, додатково перемішувати рідкий метал зварювальної ванни. Літературні та експериментальні відомості стосовно цього питання достатньо суперечливі.

Результати роботи. При дуговому зварюванні/наплавленні можливо використовувати як поперечні, так і повздовжні магнітні поля. Для створення в зоні дуги попере-

чного магнітного поля (ПОПМП) зазвичай використовують прилад (соленоїд з магнітопроводом), схему якого наведено на рис.1,а, для створення повздовжніх магнітних полів (ПОВПМ) – прилад, схему якого наведено на рис.1,б. Котушки соленоїду живлять від окремого джерела напруги.

Під впливом ПОПМП дуга практично безінерційно циклічно переміщується вздовж (або поперек) шва [1]. При цьому змінюються не тільки розміри шва в перерізі, але й форма і довжина зварювальної ванни.



- 1 – мундштук зварювального автомата; 2 – обмотка приладу;
 3 – стрижень магнітопроводу; 4 – електродний дріт; 5 – виріб;
 6 – ізоляційний прошарок

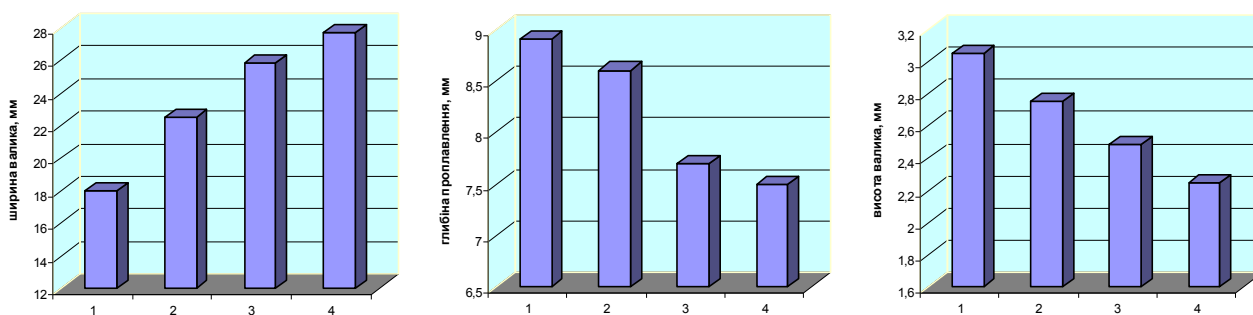
Рисунок 1 – Схема приладів для створення ПОПМП (а) та ПОВПМ (б)

Ефект розширення валика під впливом ПОПМП частотою $f=50$ Гц пов'язаний із впливом магнітного поля на дугу. При зварюванні плавким електродом (ЗПЕ) в захисних газах дуга коливається синхронно зі зміною напруженості ПОПМП, а амплітуда коливань дуги збільшується із збільшенням індукції магнітного поля в зоні дуги [2]. Використання ПОПМП перспективно для газоелектричного зварювання немагнітних і маломагнітних сталей. Проте слід зазначити, що при зварюванні в аргоні на режимах, які забезпечують струменевий перенос електродного металу при накладанні поля змінюється на великокраплинний [3]. Це не лише підвищує коефіцієнт розбрикування, але і порушує стабільність процесу. При наплавленні під флюсом на пластину з використанням ПОПМП $f=50$ Гц ширина валика збільшується на 20...25%, швидкість плавлення електроду збільшується на 10...15%, а коефіцієнт форми шва – в 1,5...2 рази [4]. При наявності розчищення кромки на пластині індукція в зоні дуги зменшується в 4...7 разів, що зменшує ефективність впливу ПОПМП на форму шва. Таким чином, використання зовнішніх (керуючих) ПОПМП не дозволяє в значній мірі впливати на геометричні розміри валиків.

Ефективним є спосіб керування дугою постійним магнітним полем, при якому дуга відхиляється в напрямку зварювання [5], але для наплавлення дротом діаметром 3...5мм під флюсом доцільно використовувати ПОПМП частотою не менш 5 Гц. Відомо, що при швидкостях зварювання більш 1,67 см/с (60 м/год) при форсуванні режиму утворюються підрізи [6]. При накладенні магнітних полів значно збільшується ширина валика та зменшується глибина проплавлення, що дозволяє збільшити швидкість зварювання в два рази без утворення підрізів [7]. Але під впливом ПОПМП напруга на ду-

зі збільшується пропорційно величині індукції. При індукції порядку 20...30 мТл дуга обривається. Саме тому при наплавленні на феромагнітні вироби збільшення ширини валика не перевищує 25%. Лише на неферомагнітних виробах ефект розширення валика під впливом ПОМПП більш значний. Ширину валика в деяких випадках можна збільшити в 1,5 рази [5].

При наплавленні суцільним дротом під флюсом з ПОВМП продуктивність підвищується на 25...30%, розсередження точки нагріву на виробі та обертання дуги навколо повздовжньої осі викликає зниження глибини наплавлення та збільшення ширини валика. При наплавленні під флюсом з ПОВМП розбризкування електродного металу знаходиться у припустимих межах [8]. Встановлено, що постійне та знакозмінне магнітне поле частотою 2...50 Гц практично однаково впливають на геометричні розміри валика наплавленого під флюсом. Постійне повздовжнє магнітне поле зміщує вісь валика в бік, який поперечно направлений наплавленню. Потік рідкого металу, що направлений поперек вектору наплавлення, підмиває бокову стінку в хвостовій частині та оплавляє її. Відповідно, повздовжня вісь зварювальної ванни з моменту впливу ПОВМП повертається відносно вектора наплавлення.



1 – без магнітного поля; 2 – ПОВМП частотою 4 Гц;
3 – ПОВМП частотою 50 Гц; 4 – постійне ПОВМП

Рисунок 2 – Залежність розмірів наплавлених валиків від частоти магнітного поля (B=20мТл)

При наплавленні в ПОВМП є імовірність виникнення пор. Це пояснюється інтенсивним обертанням дуги навколо повздовжньої її осі, яке утворює в дузі вакуум [9]. Зниження напруги дуги до 33...35 В дозволяє вирішити цю проблему. Крім того, можливо використовувати більш легований розкислювачами зварювальний дріт (наприклад Св-08Г2С), але це не завжди доцільно. З метою покращення структури, механічних властивостей та якості наплавленого шару рекомендують впливати на рідкий метал ванни низькочастотними імпульсами поля [4]. При цьому індукцію обмежують величиною 8...10 мТл, щоб попередити виплеск розплаву зварювальної ванни. Проте, при таких умовах коефіцієнт форми шва змінюється не більш, ніж у півтори рази. Для більш ефективного керування геометричними розмірами валика доцільно збільшувати частоту та величину індукції магнітного поля.

На рис.2 наведено залежність розмірів наплавлених валиків від частоти повздовжнього магнітного поля. Наплавлення проводили дротом Св-08А діаметром 5мм під шаром флюсу АН-348А. Струм наплавлення $I_H=80$ А, напруга на дузі $U_H=34...36$ В, швидкість наплавлення $V_H=8,33$ мм/с.

Висновки. Глибина проплавлення основного металу та висота валика при наплавленні з використанням ПОВМП зменшується, ширина валика збільшується. Таким чином, процес наплавлення електродним дротом під флюсом з використанням ПОВМП є більш ефективним, ніж використання ПОПМП. Він дозволяє в широких межах регулювати такі важливі геометричні характеристики перетину валика, як ширина та висота валика, глибина проплавлення, доля основного металу. Крім того, в умовах наплавлення з ПОВМП збільшується продуктивність на 20...25%, а доля участі основного металу зменшується. Це вказує на можливість широкого практичного використання магнітного поля для наплавлення або відновлення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гаген Ю.Г., Таран В.Д. Сварка магнитоуправляемой дугой. – М.: Машиностроение, 1970. – 160с.
2. Деминский Ю.А., Дятлов В.И. Магнитное управление при газоелектрической сварке плавящимся электродом// Автоматическая сварка. – 1963. – №4. – С.82-83.
3. Акулов А.И., Копаев Б.В. Магнитное управление дугой при сварке плавящимся электродом в аргоне// Автоматическая сварка. – 1972. – №7. – С.39-42.
4. Болдырев А.М., Брижев В.А., Черных А.В. Управление глубиной проплавления при дуговой сварке и наплавке с помощью продольного переменного магнитного поля// Сварочное производство. – 1993. – №6. – С.30-31.
5. Размышляев А.Д. Магнитное управление формированием швов при дуговой сварке: Монография. – Мариуполь: Изд-во ПГТУ, 2000. – 245с.
6. Технология и оборудование сварки плавлением./ Под ред. Г.Д.Никифорова. – М.: Машиностроение, 1986. – 170с.
7. Мандельберг С.Л., Лопата И.Е., Сидоренко В.Г. Влияние расположения токоподвода на формирование швов при одnodуговой сварке// Автоматическая сварка. – 1976. – №8. – С.11-15.
8. Восстановление и повышение износостойкости и срока службы деталей машин./Под ред. Попова В.С. – Запорожье: Изд-во ОАО «Мотор Сич», 2000. – 394с.
9. Леваков В.С., Любавский К.В. Влияние продольного магнитного поля на электрическую дугу с неплавящимся вольфрамовым катодом// Сварочное производство. – 1995. – №10. – С.9-12.

УДК 621.791.9(75)

ПЕРЕМІТЬКО В.В., к.т.н., доцент
ЧЕРЕДНИК Є.О., ст. викладач
КУДРЯВЦЕВ В.О., студент

Дніпродзержинський державний технічний університет

ВПЛИВ РІЗНОДИСПЕРСНОСТІ АБРАЗИВУ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ВІДНОВЛЕНИХ ДЕТАЛЕЙ

Розглянуті особливості зношування з урахуванням різнодисперсності абразиву на прикладі деталей ходової частини бульдозера. Запропоновано механізм руйнування поверхні для випадку округлої форми частинок абразиву різної їх твердості та розміру. Наведено результати лабораторного випробування зразків на зношення. Представлено значення оптимальної твердості поверхонь деталей у залежності від розмірів та долі одночасно присутніх фракцій абразиву.

Рассмотрены особенности износа с учетом разности дисперсности абразива на примере деталей ходовой части бульдозера. Предложен механизм разрушения поверхности для случая округлой формы частичек абразива разной их твердости и размера. Приведены результаты лабораторных испытаний образцов на изнашивание. Представлены значения оптимальной твердости поверхности деталей в зависимости от размеров и доли одновременно присутствующих фракций абразива.

The peculiarities of wear considering the difference in dispersion of abrasive on the example of bulldozer running gear have been examined. The mechanism of surface destruction for round abrasive particles of different hardness and size has been offered. The values of optimum surface hardness of the work pieces depending on the dimensions and the part of abrasive fractions which are simultaneously present have been introduced.

Вступ. При експлуатації бульдозерів, що працюють в різних геологічних і кліматичних умовах, міжремонтні цикли роботи гусеничного ходу визначаються переважно терміном служби опорних котків і гусеничних ланок – швидкозношуваних і дорогих деталей ходової частини. Виникає потреба у виборі матеріалів для наплавлення зношених поверхонь, враховуючи умови роботи, величину зносу, навантаження на опорні поверхні.

Руйнування металу абразивом є найпоширенішим видом зносу при роботі бульдозерів. Абразивний знос може виявлятися як яскраво виражений провідний вид зносу, що визначає працездатність деталі в цілому, або як супутній при інших видах зносу. На величину зношення впливають такі параметри абразиву як його твердість, форма, температура, вологість. У межах Донецько-Придніпровського району абразивну основу ґрунтів, що попадають у пари тертя (коток – ланка), складають кварцові піски, форма часток яких переважно напівкола. Виходячи з цього, можна передбачити, що характер зношування буде залежати, передусім, від розміру піщинок. Як правило, в контакт попадають частки різного розміру. Цей факт не враховується під час аналізу зношення деталей машин та підбору наплавлювальних матеріалів для їх відновлення та зміцнення.

Постановка задачі. Звичайно склад зносостійкого наплавленого металу і електродних матеріалів розробляються, виходячи з поставленої задачі зміцнення певних деталей або їх груп. Машини одного і того ж типу можуть працювати в різних умовах, і залежно від цих умов їх довговічність буде різною. Відповідно наплавлений метал одного і того ж складу в різних умовах роботи має різну зносостійкість. Тому при виборі складів наплавленого металу і електродних матеріалів для зміцнення певних деталей необхідно виходити з умов їх роботи.

Виходячи з цього, задачею дослідження стало з'ясування механізму зношення в умовах контакту деталей з різнодисперсним абразивом з метою подальшого визначення критеріїв вибору наплавленого металу для відновлення.

Для реалізації поставленого завдання задіяно математичне та фізичне моделювання. Для перевірки моделі та встановлення факторів, які не враховувалися у моделі, щодо впливу різного розміру абразиву на знос, проведемо лабораторні випробування зразків.

Зношення визначали по відношенню до еталонного зразка зі сталі 45 діаметром 45 мм, товщиною 10 мм, прийнятого як еталонний більшістю дослідників.

Для вибору складу зносостійкого наплавленого металу виконували наплавлення зразків різними електродними матеріалами (дротами Нп-65 і Св-08Г2С під флюсом АН-348А, АНК-18 і сумішшю флюсів (суміш №1: 75%АН-348А + 25%АНК-18; суміш №2: 50%АН-348А + 50%АНК-18; суміш №3: 25%АН-348А + 75%АНК-18) на установці для наплавлення УД-209 (дротом діаметром 1,2 мм на постійному струмі зворотної поляр-

ності при силі зварювального струму $170 \pm 10 \text{ А}$, напрузі на дузі $27 \dots 28 \text{ В}$, швидкості наплавлення 16 м/год , кроці наплавлення $3,0 \text{ мм}$) і робили вибір за наслідками випробувань на зношення наплавленого матеріалу. Випробування проводились на спеціальних машинах, які наближали лабораторні випробування до роботи бульдозера (на машині М1-1М («ролик-ролик»)) і спеціально розробленій машині («ролик-площина») з можливістю фіксації різних кутів перекосу.

Результати роботи. Суть абразивного зносу полягає в руйнуванні поверхневих контактуючих шарів матеріалу твердими частинками. Зерна абразиву можуть потрапляти на поверхні пар, що труться, ззовні, міститися в матеріалі пар або в продуктах зносу. При цьому спостерігається пластичні деформації металу, мікродряпання і мікрорізання (зняття стружки) поверхонь, що труться [1].

Зношування зв'язаних деталей 1 та 3 за наявності між ними абразивних часток 2 в загальному випадку складається з двох стадій (рис.1). На першій стадії абразивне зерно затискається між поверхнями деталей і руйнується при навантаженні, залежному від розміру зерна і твердості деталей. На другій стадії зношування здійснюється уламками зерен, які можуть шаржувати поверхневий шар однієї з деталей або піддаватися додатковому подрібненню. Залежно від розмірів, форми і механічних властивостей абразивних зерен, а також від властивостей матеріалів зв'язаних деталей співвідношення стадій і частки зносу деталей можуть бути різними.

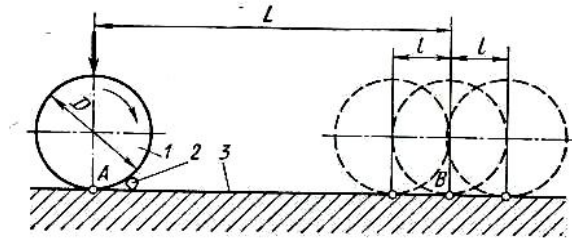


Рисунок 1 – Схема для аналізу впливу прослизання при коченні на контактно-абразивну зносостійкість

Розглянемо першу стадію зношування. Як тільки відбудеться затискання зерна між поверхнями рухомих деталей, навантаження на зерно почне різко зростати. При цьому зерно вдавлюється в поверхневі шари деталей до повного впровадження або руйнування.

При заданих розмірах сферичних кварцових зерен глибина h їх упровадження до моменту руйнування залежить від твердості H матеріалів зв'язаних деталей [2]:

$$h = \frac{P_{кр}}{\pi \times d \times H},$$

де $P_{кр}$ – навантаження на зерно до моменту руйнування (тут нехтуємо динамічними факторами і впливом дотичних сил, приймаючи їх приблизно однаковими для всіх матеріалів); d – діаметр сферичного виступу кварцового зерна; H – твердість.

Складніша картина зношування у другій стадії, коли в контакт поверхонь входять дрібні частки абразивного зерна, що руйнуються. Швидкість зношування і співвідношення зносу зв'язаних деталей залежать від того, частки упроваджуватимуться в поверхневий шар або піддадуться додатковому подрібненню.

Аналіз причин підвищення абразивної зносостійкості котків при зниженні ступеня прослизання дозволив встановити наступне: якщо деталь 1 переміщується по деталі 3 (рис.1) в умовах чистого кочення, то за одне повне обертання довжина шляху тертя (відрізок $AB = L$) дорівнює довжині кола деталі 1.

Припустимо, що комплекс всіх чинників (твердість H , діаметр абразиву d , навантаження на зерно P тощо) такий, що абразивне зерно 2 в контактi деталей 1 і 3 руйнуватиметься. Це викличе єдиний акт абразивного зношування на всьому шляху переміщення деталі 1 по деталі 3 з точки A в точку B , уламки зерна повторно не потраплять в контакт деталей, навіть якщо деякі з них впровадяться у поверхневий шар деталей.

Чисте кочення деталі 1 по деталі 3 відбувається в тому випадку, якщо деталь 1 зробить повний оберт, не зміщуючись з точки A деталі 3 . Прослизання при коченні згідно рисунку 1 відбувається в тому випадку, якщо за один повний оберт деталь 1 не потрапить в точку B .

В умовах прослизання не тільки збільшується шлях тертя для деталей 1 або 3 (залежно від знаку прослизання), але і створюються умови для посиленої дії уламків абразивного зерна або самого зерна, якщо воно виявиться непошкодженим при першому акті взаємодії з деталями 1 і 3 . Знос деталей при збільшенні ступеня прослизання підвищується, головним чином, через здійснення та інтенсифікацію другої стадії контактно-абразивного зношування. Певну роль виконує, звичайно, і загальне зростання напруження поверхневого шару при збільшенні сил тертя кочення.

При впровадженні абразивної частки в поверхню, яке супроводжується тангенціальним переміщенням частки, розвивається інтенсивна пластична деформація поверхневих об'ємів металу, що визначає їх контактну міцність. При цьому відбувається розігрівання металу в зоні тертя, що викликає термічну дію в мікрооб'ємах, залучених в деформацію, яка характеризується виділенням і відведенням теплоти, а також розвитком дифузійних процесів. У деформованому об'ємі металу виникають локальні напруження, що призводять до зародження на поверхні тертя мікротріщин і відділення часток зносу.

При шаржуванні поверхневого шару однієї деталі більше зношується, як відомо, матеріал з вищою твердістю.

В реальних умовах зношування подрібненням і шаржуванням абразивних часток поєднуються в різних співвідношеннях, від чого залежить знос кожної з деталей, які труться. Якщо переважає дроблення абразивних зерен, то більше зношуватиметься менш тверда деталь, якщо шаржування – твердіша.

Таким чином, коли знос здійснюється тільки у момент дроблення кварцових зерен, зносостійкість зв'язаних деталей з однакових по твердості матеріалів пропорційна твердості, і за відсутності прослизання знос порівну розподіляється між котком та ланкою [3].

Виходячи з того, що на сьогодні відсутня повна картина процесів, які відбуваються при зношуванні котків, можна висунути наступні гіпотези.

При попаданні в контакт абразивів різного розміру вони будуть впливати на знос деталі індивідуально, при цьому можуть виникати наступні явища, залежно від відношення твердості матеріалу (H_m) до твердості частки абразиву (H_a).

При $H_m < H_a$ цей контакт супроводжується пластичним деформуванням поверхневого шару за рахунок того, що абразив відтісняє метал, якщо в контакт вступають одночасно декілька абразивних часток, кожна з них впливає на знос окремо. Чим частка більша, тим більше деформування поверхневого шару, тобто знос збільшується зі зростанням розміру та кількості абразиву, який потрапляє в контакт.

Якщо величина глибини h впровадження абразивної частки в метал досягне певного критичного значення, то подряпина супроводжується виділенням продуктів зносу, тобто пластичне відтиснення переходить в мікрорізання.

При $H_m \geq H_a$ абразивні частки спочатку впроваджуються в поверхню металу на глибину h під зростаючим тиском робочих поверхонь котків. Частки починають подрібнюватися. Подрібнення починається з більших часток, які подрібнюються на різні

форми (гострокутні, уламкові). Подрібнення закінчується після того, як абразив досягне форми, при якій він впроваджується у поверхневий шар або проходить між зв'язаними деталями, не завдаючи ніякої шкоди.

Розглядаючи варіант, коли в контакт потрапляють частки різної форми, знос буде відбуватися наступним чином. На першому етапі гострокутні частки впроваджуються в метал на глибину h . Коли концентрація напружень досягне критичного розміру, то гострі виступи почнуть руйнуватися. Внаслідок цього, абразив прийме округлу форму. При наявності в контакту декількох часток знос поверхневого шару прямо пропорційно зростає, а руйнування часток починається з більшої.

При одночасному попаданні в контакт абразиву різного розміру, як тільки відбудеться затискання зерен у контакті, навантаження на більшу частку поступово почнуть зростати. При заданих розмірах кварцових зерен глибина впровадження h до моменту руйнування залежить від твердості H матеріалів зв'язаних деталей. Із збільшенням H абразивне зерно, яке підлягає подрібненню, зменшується. При збільшенні долі абразиву більшого розміру знос поверхні здійснюється переважно більшою часткою і буде лінійно збільшуватися, аж доки частка абразиву не досягне розміру, при якому відбудеться подрібнення. В момент подрібнення більшої частки знос деталі декілька знизиться у зв'язку з тим, що подрібнені частки менше впливають на знос. Роль у зносі меншої частки підвищується, тепер найбільший знос буде відбуватися саме по ній. При збільшенні присутності великих абразивних часток знос знову почне зростати, доки уламки більшої частки не почнуть подрібнюватися додатково, або менша частка досягне розміру, при якому відбудеться перше її подрібнення. При цьому знос знову трохи знизиться, а потім різко почне зростати.

У залежності від твердості H подрібнені частки абразивного зерна будуть упроваджуватися в поверхневий шар або піддаватися додатковому подрібненню.

У разі попадання більш дрібних часток їх вплив на знос буде залежати від ступеня подрібненості більших. У разі подрібнення більшої частки ступень зносу від дрібних часток зростає. У випадку меншого подрібнення більшої фракції абразиву знос від дрібних часток незначний.

З метою підтвердження висунутих міркувань щодо характеру зношення різнофракційним абразивом, а також визначення критеріїв щодо вибору наплавлювального металу для відновлення зношених деталей було проведено лабораторне випробування (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати випробувань зразків на зношення

Марка дроту	Флюс	Знос роликів ΔG , г, в залежності від фракції абразиву, мм				
		без абразиву	0,315	0,400	0,630	1,000
Св-08Г2С	АН-348А	0,053	0,340	0,621	1,577	0,344
	Суміш 1	0,043	1,47	1,025	0,227	0,230
	Суміш 2	0,035	0,174	0,953	0,762	0,134
	Суміш 3	0,021	0,143	0,678	0,735	0,219
	АНК-18	0,023	сколи			
Нп-65	АН-348А	0,006	1,078	2,836	0,14	0,404
	Суміш 1	0,046	0,851	1,449	0,978	0,317
	Суміш 2	0,058	1,183	0,960	0,718	0,244
	Суміш 2	0,079	0,376	0,773	0,868	0,345
	АНК-18	0,035	0,191	0,705	0,796	0,309

При контактуванні дрібного абразиву (діаметр 0,01...0,1 мм) з поверхнею деталі знос буде незначним. Метал буде легко опиратися абразивному зношенню. При попаданні в контакт абразиву розміром 0,1...0,315 мм знос зростає лінійно, не зважаючи на зміну механічних властивостей металу. Знос металу абразивними частками діаметром 0,4...1 мм відбувається неоднозначно, на що впливають одночасно декілька факторів: механічні властивості; форма абразиву; кут захоплення тощо. Ці фактори тісно пов'язані між собою і побачити тісний вплив тільки одного дуже складно. Проте, якщо розглядати залежність розміру абразиву від механічних властивостей, то при тимчасовому опорі металу в межах 250...350 МПа деталь добре опирається абразивному зношенню, не зважаючи на розміри абразиву, який попадає в контакт. При подальшому зростанні опорі металу знос різко підвищується у зв'язку з тим, що частка подрібнюється і виникають паралельно пластичному деформуванню мікрорізання та виривання.

За отриманими даними були побудовані залежності, за допомогою яких можна вибирати оптимальне поєднання матеріалів, дроту та флюсу для досягнення механічних властивостей наплавленого шару, який буде протистояти зношенню (табл.2).

Таблиця 2 – Оптимальна твердість поверхні деталей в залежності від розмірів одночасно присутніх фракцій абразиву

Фракції (X+Y), мм	Твердість, HV				
	X%≥75%	75%X+25%	50%X+50%	25%X+75%	X%≤25%
0,315+0,4	285	305	320	344	364
0,315+0,63	285	312	340	367	395
0,315+1,0	285	321	360	397	435
0,4+0,63	364	371	380	387	395
0,4+1,0	364	381	400	417	435
0,63+1	395	404	415	424	435

Запропонована твердість наплавленого шару визначалася з умови зносостійкості контртіла (ланки) і можливості експлуатації відновлених деталей без механічної обробки. Стійкість деталей, відновлених за запропонованою технологією і запропонованими матеріалами, збільшує їх термін служби при промислових випробуваннях у 1,8...2,0 рази.

Висновки. Абразивні частинки різного розміру впливають на знос деталі індивідуально. Механізм руйнування буде залежати від співвідношення твердості матеріалу деталі та часток абразиву. За умови подібності форми абразивних часток (округла) вплив на знос дрібніших буде залежати від ступеня подрібненості більших. У разі суттєвого подрібнення більшої частки ступень зношення від дрібніших часток зростає і навпаки. Запропоновані значення оптимальної твердості поверхні деталей контактної пари „коток – ланка” для різного співвідношення двох переважних фракцій абразиву.

ЛІТЕРАТУРА

1. Современные наплавочные материалы / И.Н. Шеенко, В.Д. Орешкин, Ю.Д. Репкин. – К.: Наукова думка, 1980. – 238с.
2. Молодык Н.В., Зенкин А.С. Восстановление деталей машин. Справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 480с.
3. Гальперин А.С., Сушкович М.И. Определение оптимальной долговечности машин.-М.: Машиностроение, 1970. – 183с.

УДК 621.791.5

ИВЧЕНКО П.С., к.т.н., доцент
МИЛЮТИН В.Н., к.т.н., профессор

Днепродзержинский государственный технический университет

**ПРИЧИНЫ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН В СВАРНЫХ
ИЗДЕЛИЯХ ИЗ СТАЛИ КВК**

У роботі досліджені причини виникнення тріщин при зварюванні виробів зі сталі КВК. Встановлено, що основною причиною є режим зварювання виробів. Запропоновані нові режими для усунення холодних тріщин у виробах.

В работе исследованы причины образования трещин при сварке изделий из стали КВК. Установлено, что основной причиной является режим сварки изделий. Предложены новые режимы для устранения холодных трещин в изделиях.

In work reasons are explored of formation of cracks at welding of wares from the steel KVK. It is set, that the mode is a principal reason of welding of wares. New modes are offered for the removal of cold cracks in wares.

Введение. При изготовлении сварных конструкций наблюдаются случаи появления трещин в изделиях, подвергающихся термообработке (ТО). Размеры трещин, как правило, невелики, но они могут явиться источником разрушений в процессе эксплуатации изделия или его испытания.

Образование трещин зависит от свойств стали, жесткости закрепления изделия, нарушения технологии сварки и термообработки и т.п., но общей причиной может быть снижение ресурса пластичности металла на стадии межзеренных разрушений при деформации ползучести, обусловленной релаксацией внутренних напряжений в результате структурных превращений или внешней нагрузки. При нагреве для термической обработки изделий сложной формы возможно появление дополнительных напряжений за счет неравномерного нагрева отдельных элементов.

Интервал температур, в котором наиболее вероятно образование трещин термической обработки (ТТО), зависит от конкретного материала, но при сварке конструкций из низколегированных или аустенитных сталей он составляет соответственно 500-700 и 600-900° С [1].

При металлографических исследованиях ТТО отличаются от кристаллизационных и холодных трещин при сварке. Кристаллизационные трещины в металле шва располагаются по границам дендритов, ячеек или блоков, имеют зазубренные края и переменное раскрытие, а холодные трещины развиваются полностью по границам зерен лишь в случае разрушения, протяженность которого не превышает одного или нескольких диаметров зерен. При дальнейшем развитии холодные трещины обычно имеют смешанный характер – проходят как по границам, так и по телу зерна [2].

Трещины, возникающие при термической обработке, всегда следуют по границам первичных зерен, имеют гладкие края и правильное геометрическое раскрытие.

Постановка задачи. С целью выявления причин образования трещин в обечайке из стали КВК были проведены эксперименты по влиянию:

- термической обработки;
- деформации исходных элементов;
- сварки на деформацию корпуса обечайки;
- правки в закаленном состоянии;

- режимов сварки;
- водорода;
- возникающих термических напряжений и деформаций.

Результаты работы. *Влияние термической обработки.* С целью определения влияния ТО конструкции изделия на образование трещин в сварных швах корпусов изделий из стали КВК были проверены изделия: 361 корпус после полного цикла ТО и 334 корпуса до ТО. По данным рентгенографического контроля обнаружено 85 дефектных корпусов до ТО (25.4%) и 146 – после ТО (40.4%). Результаты исследований представлены в табл.1.

Таблица 1 - Наличие трещин в обечайке до и после термообработки

№ изделия	отжиг		после полной ТО		№ изделия	отжиг		после полной ТО	
	кол-во трещин	% к общему кол-ву	кол-во трещин	% к общему кол-ву		кол-во трещин	% к общему кол-ву	кол-во трещин	% к общему кол-ву
1	13	5.8	13	7.8	24	5	2.2	6	3.6
2	29	12.9	11	6.6	28	2	0.9	2	1.2
3	1	0.4	3	1.8	30	1	0.4	3	1.8
4	4	1.8	8	4.8	32	8	3.6	4	
5	7	3.1	7	4.2	34	4	1.8	2	1.2
6	2	0.9	2	1.2	35	-	-	11	0.6
7	-	-	2	1.2	36	6	2.7	7	4.2
8	9	4.0	9	5.4	37	5	2.2	3	1.8
10	9	4.0	5	3.0	39	25	11.2	6	3.6
11	1	0.4	-	-	40	3	1.3	2	1.2
12	9	4.0	4	2.4	42	6	2.7	7	4.2
14	4	1.8	3	1.8	44	3	1.3	4	2.4
16	44	19.6	10	6.0	46	6	2.7	4	2.4
18	10	4.5	3	1.8	48	1	0.4	6	3.6
20	4	1.8	6	3.6	49	1	0.4	-	3.6
22	-	-	2	1.2	50	2	0.9	6	3.6
23	-	-	6	3.6	-	-	-	-	-

Из данных табл.1 видно, что наиболее склонны к образованию ТТО сварные швы в изделиях № 1,2,16,18,39. Связь образования трещин с технологией сварки и квалификацией сварщика установлена не была, и поэтому все внимание было обращено на ТО изделий, которые после сварки подвергались отжигу при 580° С в течение 30 мин. и охлаждались на воздухе.

Для оценки влияния ТО на образование трещин было предложено для одной части изделий заменить отжиг после сварки (580°С, 30 мин.) на более низкотемпературный (230°С, 60 мин.), а для другой – снизить температуру первой ступени полной ТО с 580 до 400° С. После ТО проводились все этапы рентгенографического и магнитного контроля. На основании данных контроля было установлено, что процесс трещинообразования практически не зависит от режимов ТО.

Деформация исходных элементов. Результаты замеров разности диаметров (эллипсность) после деформации исходных элементов для серии обечаек показали, что в каждой серии уже есть (до приварки арматуры) корпуса, у которых разность диаметров превышает предельно допустимую для готового изделия 2.0 мм и составляет: перед приваркой фланцев от 0.3 до 2.0 мм; после приварки фланцев от 0.3 до 3 мм и с приваренными фланцами после отжига от 1.0 до 2.1 мм.

Влияние сварки на деформацию корпуса. С целью определения влияния сварки на деформацию корпуса было выбрано 15 корпусов изделия. Разность диаметров заме-

ряли „по обечайке” и „по сварке”. Замеры осуществлялись после сборки, сварки и первого отжига (580° С, 30 мин.) „до закалки”, после полной закалки („после закалки”) и после нормализации (230° С, 2 часа). Результаты замеров приведены в табл.2.

Таблица 2 – Разность диаметров изделия в зависимости от режимов термообработки

№ корпуса	до закалки		после закалки		после нормализации	
	„по сварке”	„по обечайке”	„по сварке”	„по обечайке”	„по сварке”	„по обечайке”
019587	1.0	1.0	2.4	2.0	1.4	1.4
019691	2.2	2.0	4.2	4.6	2.5	1.5
019693	1.7	1.0	3.6	2.4	1.6	0.5
019696	1.8	2.5	2.9	4.1	1.8	1.9
019698	2.0	1.3	3.8	2.4	2.0	1.4
019702	2.0	1.5	3.7	3.0	1.6	1.0
019704	1.7	3.0	4.0	5.0	1.7	1.3
019707	1.5	2.7	3.1	4.9	1.6	1.6
019708	1.5	2.0	2.9	4.5	1.9	0.6
019715	1.8	4.0	3.5	5.1	1.5	1.7
019716	1.6	1.1	3.5	2.8	2.8	1.0
019719	1.7	1.5	3.5	3.7	1.9	1.5
019720	2.0	2.0	4.1	4.6	1.8	1.5
019722	2.2	2.5	4.0	4.8	2.5	2.0
019734	2.3	2.1	4.1	4.3	2.3	2.1

Полученные результаты показывают, что уже в исходных элементах, до приварки арматуры, есть недопустимые отклонения от предельной разности диаметров 2.0 мм. Результаты деформации корпусов показали, что уже после сборки сварки арматуры и первого отжига (580°С, 30 мин.) у 47% корпусов наблюдается превышение допустимого отклонения. После закалки все 100% корпусов не соответствуют допускам, а после правки струбцинами и нормализации 27% корпусов не снизили разность диаметров. Так как правка изделия ведется уже в закаленном состоянии при максимальной прочности изделия, а температура правки 220°С не способствует пластической деформации сварных швов, то именно в процессе правки наиболее вероятно максимальное образование трещин.

Металлографические исследования. С целью окончательного определения причин трещинообразования был выполнен полный комплекс металлографических исследований. На первом этапе к обечайкам из стали КВК-26 и КВК-32 приваривали по два элемента арматуры по существующей технологии с присадочной проволокой ЭП-324. Одна часть образцов была подвергнута термообработке (580°С, 30 мин.) по существующему режиму, а другая – при 220° С в течение 1 часа. Режим термообработки образцов приведен в табл.3.

Таблица 3 – Режим термообработки образцов

Условное обозначение	Материал обечайки	Режим термообработки
522	КВК-26	220° С, 1 ч.
532	КВК-32	220° С, 1 ч.
525	КВК-26	580° С, 30 мин.
535	КВК-32	580° С, 30 мин.

Макрофотографии сварных швов приведены на рис.1 при увеличении \times^5 .

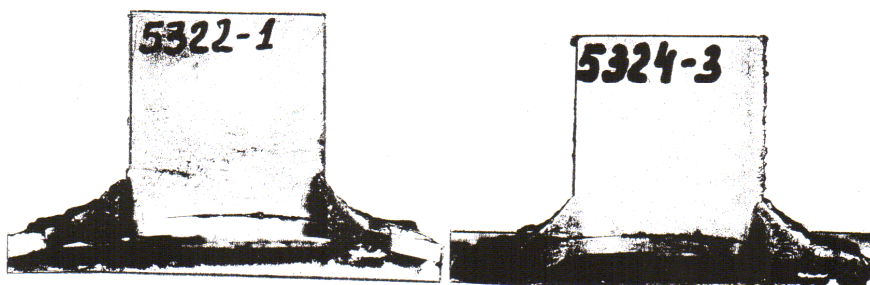


Рисунок 1 - Микрошлифы сварных образцов, \times^5

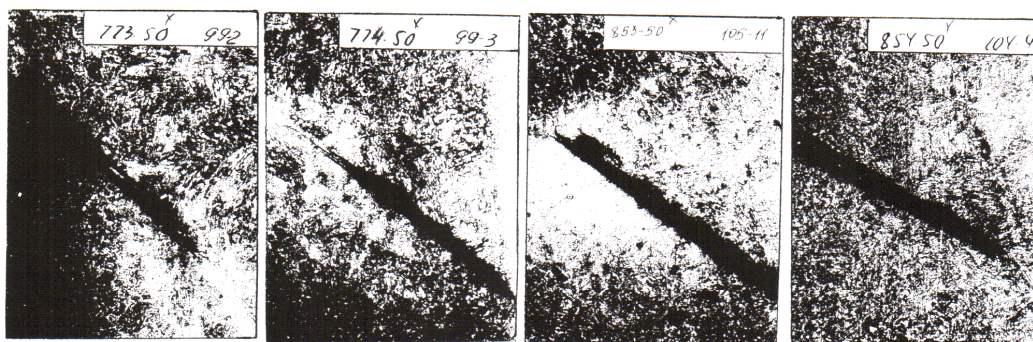


Рисунок 2 - Микроструктура корня шва образца 522.1-4, \times^{50}

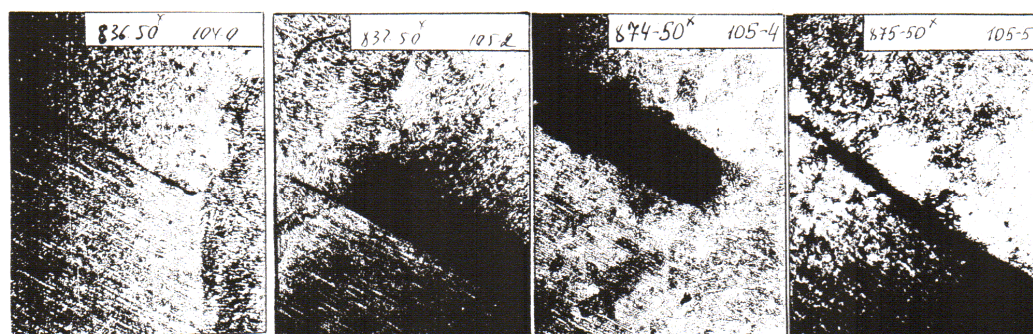


Рисунок 3 - Микроструктура корня шва образца 532.1-2, \times^{50}

Рисунок 4 - Микроструктура корня шва образца 535.1-2, \times^{50}

Результаты рентгенографического контроля выявили трещину в шве 532-1 и поры в шве 522-4. Значительный провар на обечайках из стали КВК-32 объясняется их меньшей толщиной по сравнению с обечайками из стали КВК-26. Микроисследования сварных швов показали неглубокое проплавление основного металла, что однако удовлетворяло требованиям ТУ.

Результаты металлографических исследований корня шва показаны на рис. 2.2 - 2.4. На многих микрошлифах отчетливо видны трещины в корне сварного шва, а на некоторых из них видны трещины и в теле шва. Комплекс проведенных металлографических исследований по толщине сварного шва показал, что по сечению сварного шва трещин нет, а есть только одно место образования трещин – корень шва.

Было высказано предположение, что причиной образования трещин является большая разность толщин обечаек (в 10 раз), и при термообработке возможно образование больших термомеханических напряжений, которые и приводят к образованию трещин.

Для проверки этого предположения, а также установления влияния режима термообработки, сварки и наличия присадочного материала во 2-й партии опытов на обечайку из стали КВК-26 на разных режимах приваривали элемент арматуры с пазами на боковых гранях глубиной 2-3 мм с тем, чтобы припуск на сварку составлял не менее толщины обечайки.

Все образцы были разделены на три группы, которые подвергались различным режимам термообработки (табл.4).

Таблица 4 – Режимы термообработки и сварки образцов

№	Режимы термообработки	Сварочный ток, А	Наличие присадки
521	220° С, 1 ч.	190	с присадкой
522		140	с присадкой
523		140	без присадки
524		190	без присадки
551	580° С, 30 мин.	200	с присадкой
552		130	с присадкой
553		130	без присадки
554		200	без присадки
591	920° С, 10 мин. (закалка в масле)	135	с присадкой
592		195	с присадкой
593		135	без присадки
594	250° С, 2 ч. (сущ. режим ТО)	195	без присадки

Образцы подвергались всем видам контроля, и по его результатам были обнаружены трещины в образцах 524,551,554,592,594, за исключением образца 553 (сварка без присадки). Режим сварки образцов $I_{св} = 190-200А$, хотя для толщины 2.5 мм рекомендован $I_{св} = 115-190А$.

Влияние режимов сварки. Полученные результаты подтвердили, что причиной образования трещин является повышенный режим сварки, а не термообработки, так как при изменении последнего результаты не изменялись. Поэтому была изготовлена третья партия образцов с фиксированным зазором 0.25-0,05 мм и глубиной 3.0 мм в корне сварного шва, что достигалось фрезерованием деталей арматуры.

Анализ представленных результатов показал, что:

1. Режимы термообработки и последующего низкотемпературного отпуска на образование трещин в корне шва не влияют.
2. Наиболее благоприятное формирование корня шва осуществляется при сварке на пониженном до 145-150 А сварочном токе.
3. Учитывая, что изделие на заключительной стадии подвергается полной термообработке, было предложено промежуточный отжиг (580°С, 30 мин.) заменить более низкотемпературным – 230° С, 60 минут.

Влияние водорода на образование холодных трещин в сталях КВК. В работе с использованием хроматографа определялось абсолютное содержание диффузионного водорода в наплавленном металле, влияние „влажного” и „сухого” аргона, а также исследовалась кинетика выделения водорода из сварочных материалов.

Среднее содержание водорода в исходных образцах из стали КВК-32 составило 0.22 см³/100 г, в проволоке ЭП-324 – 0.65 см³/100 г. Для стали КВК-26 при использовании „сухого” аргона содержание водорода составило 0.12 см³/100 г и „влажного” – 1.44 см³/100 г, а для проволоки соответственно 0.087 и 0.99 см³/100 г. Установлено, что при нагреве до 200° С в течение 1 часа из сварочных материалов удалялось более 75% водорода.

По данным работы [3] предельное содержание Н_д, вызывающее появление холодных трещин, составляет 1.5 см³/100 г.

Влияние возникающих термических напряжений и деформаций. Исследуемые элементы сварной конструкции – обечайка ($\delta = 2-2.5$ мм), арматура ($\delta = 20$ мм) и соединяющий их катет сварного шва ($\delta = 3$ мм) – имеют различную толщину, и при посадке их в печь с температурой 580° С в результате резкого нагрева происходит неравномерная температурная деформация разнотолщинных элементов, что может вызвать образование трещин в сварных швах [4].

Расчет скоростей нагрева и их предельных температур для условий печного нагрева производился на ЭВМ методом сеток по неявной расчетной схеме для бесконечной пластины [5]. Температурные зависимости теплофизических свойств металла элементов задавались табличные из предположения, что между заданными точками (с шагом 33 и 50° С) эти зависимости не изменяются.

Было установлено, что максимальные напряжения растяжения образуются в месте контакта со стороны более толстой детали (арматуры) и составляют 70% от $\sigma_{0.2}$ через 10 с. и больше не увеличиваются в случае опускания изделия в печь с $t = 580^\circ \text{C}$. При опускании изделия в печь с $t = 250^\circ \text{C}$ растягивающие напряжения составляют 20% от $\sigma_{0.2}$ через 6 с. и возрастают до 25% от $\sigma_{0.2}$ при нагреве изделия в печи до $t = 580^\circ \text{C}$.

Выводы.

1. Процесс образования трещин не зависит от режима термообработки, скорости нагрева изделия в процессе термообработки и от количества диффузионного водорода в сварном шве.
2. Образование трещин в сварных швах арматуры из стали КВК происходит из-за повышенного сварочного тока.
3. Расчет режима сварки необходимо производить для более тонкого металла или сварку корня шва вести на сварочном токе 100-120А, а затем накладывать заданный катет на увеличенном до 200-220А сварочном токе.
4. Создание зазора шириной 0.2-0.3 мм между арматурой и корпусом изделия позволяет избежать образования трещин в корне шва и позволяет четко разделить трещины и непровары при рентгенографическом контроле.
5. Количество водорода в наплавленном металле при использовании аргона различной влажности и выделяющегося из сварочных материалов ниже предельного и не способствует образованию холодных трещин в стали КВК.

6. Термические напряжения в сварных швах не достигают критических значений и не могут служить причиной образования трещин в корне сварного шва.
7. Нагрев изделия совместно с печью снижает термические напряжения в корне шва.

ЛИТЕРАТУРА

1. Земзин В.Н., Шрон Р.Э. Термическая обработка и свойства сварных соединений. – Л.: Машиностроение, 1976. – 367с.
2. Сварка в машиностроении. Т.3 /Под ред. В.А. Винокурова. – М.: Машиностроение, 1979. – С.282-296.
3. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М.:Машиностроение, 1981. – 247с.
4. Прохоров Н.Н. Технологическая прочность сварных швов в процессе кристаллизации. – М.: Металлургия, 1979. – 248с.
5. Винокуров В.А. Сварочные напряжения и деформации. – М.:Машиностроение, 1968. – 236с.

УДК 621.791.5

МИЛЮТИН В.Н., д.ф.-т.н., профессор

Днепродзержинский государственный технический университет

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТА С ПРИСАДОЧНЫМ МАТЕРИАЛОМ

У роботі наведені результати дослідження автоматичного двохдугового зварювання під флюсом з гранульованим присадковим матеріалом за один прохід товстолистового прокату зі сталі 09Г2.

В работе приведены результаты исследования автоматической двухдуговой сварки под флюсом с гранулированным присадочным материалом за один проход толстолистового проката из стали 09Г2.

In work results are resulted of research of the automatic arc welding under gumboil with the granular additional material for one passage-way of rental of large thickness from the steel 09Г2.

Введение. При изготовлении многих тяжело нагруженных крупногабаритных металлических конструкций возникает необходимость выполнять сварку стыковых соединений толстолистовых (35-100 мм) элементов из различных сталей. В настоящее время отдельные толстолистовые детали соединяют в основном следующими способами:

- автоматической многопроходной сваркой под флюсом (АСФ);
- в защитных газах с разделкой кромок (ЗГРК);
- электрошлаковой сваркой (ЭШС).

Большое внимание уделяется многопроходной сварке в щелевую разделку в защитном газе или под флюсом. Перспективным способом является шагодуговая сварка по узкому зазору с программированием параметров режима и автоматическая 2-х и 3-х дуговая сварка под флюсом с присадочным гранулированным материалом (ПГМ).

Основные особенности сварки толстолистового металла, трудности и недостатки различных способов отмечены в работах [1,2]. Основным недостатком многопро-

ходной автоматической сварки с разделкой кромок является большой расход сварочных материалов, высокая энерго- и трудоемкость процесса, высокие остаточные напряжения, большая склонность к появлению дефектов в шве и др.

Применение перспективного способа многопроходной сварки в щелевую разделку сдерживается отсутствием специального оборудования и необходимостью строгого соблюдения требований по сборке стыков, режиму сварки и порядку укладки валиков. Попытки уменьшения числа проходов при АСФ приводят к увеличению дефектов в сварном шве типа усадочных трещин, газовых и шлаковых включений, а также снижению механических свойств металла шва и околошовной зоны (ОШЗ). Для ЭШС, кроме перечисленных недостатков, присущи необходимость проведения высокотемпературной обработки сварных деталей, низкая ударная вязкость металла шва, ОШЗ и т.д.

По способу Ждановского государственного технического университета (ЖГТУ) механические характеристики металла шва и ОШЗ близки по результатам к многопроходной в щелевую разделку и находятся на уровне свойств основного металла. Ударная вязкость металла по оси шва в 1.8 раза больше по сравнению с многопроходной сваркой (107 и 59 Дж/см² соответственно), причем диапазон значений ударной вязкости при шагодуговой сварке значительно уже, что связано с особым характером кристаллизации жидкого металла сварочной ванны.

Перспективным направлением в развитии сварочного производства является внедрение в промышленную эксплуатацию оборудования и технологии АСФ с применением сплошного или сыпучего вспомогательного присадочного материала, подаваемого в зону дуги или в зазор между стыками. В качестве присадочного материала используется резанная сварочная проволока диаметром 1.6...2 мм и длиной 1.5...2 мм, железный порошок, окатыши и др.

Наибольшее распространение получил способ сварки с предварительным заполнением присадкой зазора между сварочными кромками или в разделку собранного узла. Сварку с ПГМ в основном применяют для выполнения в нижнем положении или в “лодочку” стыковых швов с расширением кромок, угловых швов и наплавки.

Благоприятные условия кристаллизации и термический цикл при сварке с ПГМ обеспечивают высокие механические свойства сварных соединений на уровне свойств основного металла. Сварочные напряжения и деформации на 15-20% меньше, а содержание остаточных газов незначительно отличается по сравнению с обычной сваркой. Сопротивляемость горячим трещинам в 1.7-2.4 раза больше, а холодным – в 1.5 раза [4].

Вследствие применения ПГМ увеличивается производительность сварки (в 1.5-2.0 раза), меньше перегревается металл, улучшается его стойкость против горячих и холодных трещин при сварке, а также улучшается ряд других свойств.

Постановка задачи. При производстве тяжело нагруженных крупногабаритных металлических сварных конструкций иногда возникает необходимость укрупнения плит из горячекатаного листового проката размером 5000x2000x50-100мм из различных сталей. Были проведены эксперименты по автоматической 2-х дуговой сварке под флюсом образцов стали 09Г2 из толстолистового проката (($\delta = 50$ мм) за один проход с использованием ПГМ без предварительного подогрева и с последующим „термическим отдыхом”. Химический состав стали приведен в табл.1, а механические свойства – в табл. 2.

Таблица 1 – Химический состав стали по ГОСТ 2246-80

Марка стали	C	Si	Mn	массовая доля, %			
				P	S	Cr	Ni
09Г2	≤0.08	0.70-0.95	1.80-2.10	0,025	0,030	0,20	0,25

Таблица 2 – Механические свойства основного металла

Материал	σ_n	σ_b	$\delta, \%$	КСУ, Дж/см ² при t, °С	
	МПа			+ 20	- 40
Сталь 09Г2	290	460	21.0	60	35

Сталь обладает хорошей свариваемостью и поэтому до и в процессе сварки не требуется предварительный подогрев или последующая термическая обработка. Эта сталь не склонна к образованию горячих и холодных трещин.

В качестве сварочных материалов использовалась проволока Св-10ГА, флюс АН-60 и присадочный материал (ПГМ) – рубленая проволока 1.6Св-08Г2С длиной 1.5 - 2 мм.

Автоматическая сварка стыковых образцов размером 300x300x50 мм с зазором 10мм производилась модернизированным 2-хдуговым автоматом ДТС-45 под флюсом АН-60 и ПГМ за один проход на неохлаждаемой медной подкладке проволокой марки Св-10ГА диаметром 5.0 мм постоянным током. Источники питания дуг – два выпрямителя типа ВДУ-1603-У3. Режимы сварки приведены в табл.3.

Таблица 3 – Режимы 2-хдуговой автоматической сварки под флюсом

$I_{св}, А$	$U_{д}, В$	$V_{п.п},$ м/ч	$V_{св},$ м/ч	$l_э,$ мм	$l_{1,2} \text{ д},$ мм	$\alpha,$ ду- ги град.	Род тока	$\alpha,$ г/А.ч
1300*	48	177	14	50	30	90	постоянный, обратная полярность	37
1200	44	160		60	50	45		36

Примечание: * числитель – 1-я дуга; знаменатель – 2-я дуга;

Для снижения уровня остаточных сварочных напряжений и улучшения свойств металла сварного соединения после сварки применялась местная термообработка („термический отдых“) за счет нагрева сварного соединения до температуры 250-300⁰С со следующей выдержкой в течение 4 часов. Скорость нагревания и охлаждения после „термического отдыха“ должна составлять $\leq 300...400^0\text{С/ч}$. Для нагревания сварочного стыка плит могут использоваться электронагреватели комбинированного действия марки КЕН-3 или другие, которые устанавливаются в верхней и нижней стороне стыка по 5 штук, обеспечивая ширину нагрева зоны термического влияния (ЗТВ), равную 200 мм. Электронагреватели создают температуру нагрева до 1000⁰С, что может быть также использовано для высокого отпуска. Охлаждение сварочного соединения выполняется до температуры 100⁰С под слоем теплоизоляции, а потом на спокойном воздухе.

Исследование свойств готовых образцов производилось по стандартным методикам. Сваренные стыковые образцы разрезались для определения механических свойств металла шва и сварного соединения, изготовления макро- и микрошлифов, рентгенографического контроля и т.д.

Механические свойства металла шва и сварного соединения определялись на образцах по ГОСТ 6996-66: цилиндрические разрывные – тип II; плоские разрывные – тип XIII; на ударный изгиб – тип VI; на изгиб сварного соединения – тип XXVII.

Образцы на ударный изгиб изготавливались с надрезом по Менаже, расположенном в верхнем слое сварного шва и в ОШЗ. При изготовлении цилиндрических образцов на разрыв бралась стружка для определения химического состава металла шва. Средний химический состав металла шва приведен в табл.4.

Таблица 4 – Средний химический состав металла шва

массовая доля, %					
Содержание элементов					
C	Si	Mn	S	P	Cu
0.10	0.40	1.35	0.025	0.023	0.14

Результаты работы. При сварке толстолистовой стали необходимо учитывать изменение значительного числа переменных факторов, влияющих на качество металла шва и сварного соединения.

С целью учета одновременного влияния различных факторов при постановке экспериментов использовался метод математического планирования, позволяющий выбрать оптимальное соотношение факторов. К числу факторов, влияющих на качество металла шва и сварного соединения, относятся в основном параметры режима: сила тока, напряжение дуги, скорость сварки и подачи проволоки, род и полярность тока и т.п.

Объектом оптимизации были выбраны механические свойства металла шва и сварного соединения (y_1, y_2), а факторами варьирования – сила тока (x_1), напряжение дуги (x_2), скорость подачи проволоки (x_3) и скорость сварки (x_4).

Расчет коэффициентов регрессии и значений функций отклика производился по ротатабельным центрально-композиционным планам (РЦКП), дающим одинаковую дисперсию на равных расстояниях от центра плана. В процессе исследований был реализован полный факторный эксперимент типа $N = 2^{4-1}$ с эффектом взаимодействия, генерирующим соотношением $x_4 = x_1 x_2 x_3$ и определяющим контрастом $I = x_1 x_2 x_3 x_4$.

В качестве математической модели был использован полином второй степени:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} x_i x_j \dots,$$

где y – параметр оптимизации; x_i ($i=1, k$) – учитываемые факторы, характеризующие процесс сварки; k – количество учитываемых факторов; b_i, b_{ii}, b_{ij} – параметры модели, подлежащие статистической оценке. Уровни и интервалы варьирования параметров приведены в табл.5, а матрица планирования и результаты опытов – в табл.6.

Таблица 5 – Уровни и интервалы варьирования при сварке под флюсом с ПМГ

Показатели		I, А	U, В	$V_{п.пр.}$, м/ч	$V_{св.}$, м/ч
		x_1	x_2	x_3	x_4
Верхний уровень	(+1)	1400	50	250	20
Основной уровень	(0)	1200	40	200	15
Нижний уровень	(-1)	1000	30	150	10
Интервал варьирования	(i)	200	10	50	5
Звездное плечо	(-2)	800	20	100	5
Звездное плечо	(+2)	1600	60	300	25

Таблица 6 – Матрица планирования и результаты опытов

№ рандомизированного опыта	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Металл шва				Сварное соединение			
					σ _в , МПа	σ _т , МПа	Ударная вязкость КСУ, Дж/см ² , при температуре, °С		σ _в , МПа	Ударная вязкость КСУ, Дж/см ² , при температуре, °С		
							+ 20	- 40		+ 20	- 40	
7	-	-	+	+	455	285	55	32	428	51	30	
2	+	-	-	+	458	282	59	34	429	55	34	
8	-	+	-	+	453	280	54	31	426	50	31	
3	+	+	+	+	457	287	56	33	430	53	32	
1	-	-	-	-	455	286	58	31	428	54	33	
4	+	-	+	-	452	278	53	30	425	50	30	
9	-	+	+	-	456	288	57	34	429	56	33	
6	+	+	-	-	457	285	55	33	430	53	32	
5	-2	0	0	0	453	281	53	30	426	50	30	
11	+2	0	0	0	455	285	54	32	428	51	31	
16	0	-2	0	0	457	288	58	35	430	54	32	
13	0	+2	0	0	458	288	57	34	431	55	33	
12	0	0	-2	0	455	286	55	31	426	51	33	
14	0	0	+2	0	453	285	52	30	432	55	34	
10	0	0	0	-2	459	281	58	35	428	54	32	
15	0	0	0	+2	456	287	56	32	427	53	32	

Обработка данных экспериментов, расчеты значений функций отклика и коэффициентов регрессии производились по программе “Statistica”. В результате были получены уравнения регрессии для определения свойств металла шва и сварного соединения.

Механические свойства металла шва в зависимости от I_{св} и U_д:

$$\sigma_{в} = 455,137 - 0,0062 \cdot x_1 + 0,0807 \cdot x_2 + 3,832E-6 \cdot x_1^2 - 3,4572E-6 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,0006 \cdot x_2^2;$$

$$\sigma_{т} = 284,985 - 0,0054 \cdot x_1 + 0,053 \cdot x_2 + 2,5913E-6 \cdot x_1^2 - 1,7774E-5 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0002 \cdot x_2^2;$$

$$КСУ_{+20} = 55,221 - 0,0038 \cdot x_1 + 0,1956 \cdot x_2 + 1,8287E-6 \cdot x_1^2 - 1,2912E-5 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,0027 \cdot x_2^2;$$

$$КСУ_{-40} = 32,193 - 0,0054 \cdot x_1 + 0,0982 \cdot x_2 + 3,1212E-6 \cdot x_1^2 - 4,9203E-6 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,001 \cdot x_2^2.$$

Механические свойства металла сварного соединения в зависимости от I_{св} и U_д:

$$\sigma_{в} = 428,410 - 0,0059 \cdot x_1 + 0,0431 \cdot x_2 + 3,4062E-6 \cdot x_1^2 + 1,4596E-6 \cdot x_1 \cdot x_2 + 3,3832E-5 \cdot x_2^2;$$

$$КСУ_{+20} = 54,658 - 0,0204 \cdot x_1 - 0,6682 \cdot x_2 + 1,2145E-5 \cdot x_1^2 + 0,0002 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0112 \cdot x_2^2;$$

$$КСУ_{-40} = 32,575 - 0,0039 \cdot x_1 + 0,011 \cdot x_2 + 1,8149E-6 \cdot x_1^2 + 2,0063E-5 \cdot x_1 \cdot x_2 - 9,418E-5 \cdot x_2^2.$$

Механические свойства металла шва в зависимости от I_{св} и V_{п.пр}:

$$\sigma_{в} = 456,362 - 0,0045 \cdot x_1 - 0,0032 \cdot x_3 + 2,2843E-6 \cdot x_1^2 + 1,0583E-5 \cdot x_1 \cdot x_3 - 2,0108E-5 \cdot x_3^2;$$

$$\sigma_T = 285,665 - 0,004 * x_1 - 0,0038 * x_3 + 1,9087E-6 * x_1^2 - 3,3465E-6 * x_1 * x_3 + 2,39E-5 * x_3^2;$$

$$KCU_{+20} = 56,7306 - 0,0016 * x_1 - 0,0031 * x_3 - 2,8379E-7 * x_1^2 + 1,5231E-5 * x_1 * x_3 - 3,3149E-5 * x_3^2;$$

$$KCU_{-40} = 33,473 - 0,0034 * x_1 - 0,0103 * x_3 + 1,491E-6 * x_1^2 + 9,368E-6 * x_1 * x_3 + 1,5135E-6 * x_3^2.$$

Механические свойства металла сварного соединения в зависимости от $I_{св}$, $V_{п.пр}$:

$$\sigma_B = 428,377 - 0,005 * x_1 + 0,0098 * x_3 + 3,2344E-6 * x_1^2 - 5,1006E-6 * x_1 * x_3^2 - 2,938E-6 * x_3^2;$$

$$KCU_{+20} = 53,231 - 0,0214 * x_1 + 1,0812 * x_3 + 1,4573E-5 * x_1^2 - 0,0003 * x_1 * x_3^2 * x_3 - 0,0503 * x_3^2;$$

$$KCU_{-40} = 32,104 - 0,0038 * x_1 + 0,018 * x_3 + 1,9869E-6 * x_1^2 + 5,0061E-7 * x_1 * x_3 - 3,8375E-5 * x_3^2.$$

Механические свойства металла шва в зависимости от $I_{св}$ и $V_{св}$:

$$\sigma_B = 456,215 - 0,0076 * x_1 + 0,2009 * x_4 + 3,9522E-6 * x_1^2 + 0,0002 * x_1 * x_4 - 0,0127 * x_4^2;$$

$$\sigma_T = 285,812 - 0,0028 * x_1 - 0,1624 * x_4 + 1,1332E-6 * x_1^2 + 6,4162E-6 * x_1 * x_4 + 0,0074 * x_4^2;$$

$$KCU_{+20} = 55,721 - 0,0047 * x_1 + 0,3635 * x_4 + 1,9323E-6 * x_1^2 + 5,7636E-5 * x_1 * x_4 - 0,0141 * x_4^2;$$

$$KCU_{-40} = 32,774 - 0,0059 * x_1 + 0,2357 * x_4 + 3,1047E-6 * x_1^2 + 6,0106E-5 * x_1 * x_4 - 0,0102 * x_4^2.$$

Механические свойства металла сварного соединения в зависимости от $I_{св}$ и $V_{св}$:

$$\sigma_B = 429,524 - 0,0054 * x_1 - 0,0912 * x_4 + 2,6782E-6 * x_1^2 + 0,0001 * x_1 * x_4 - 0,0007 * x_4^2;$$

$$KCU_{+20} = 53,231 - 0,0214 * x_1 + 1,0812 * x_4 + 1,4573E-5 * x_1^2 - 0,0003 * x_1 * x_4 - 0,0503 * x_4^2;$$

$$KCU_{-40} = 32,817 - 0,0042 * x_1 + 0,0689 * x_4 + 1,8733E-6 * x_1^2 + 7,965E-5 * x_1 * x_4 - 0,0046 * x_4^2.$$

Адекватность полученных уравнений оценивалась по критериям Фишера и Стьюдента, которые были меньше табличных значений при $\alpha = 0.05$.

Полученные уравнения регрессии имеют коэффициенты детерминации $R^2 = 0.80-0.91$, что свидетельствует об их работоспособности.

Зависимость предела текучести и ударной вязкости металла шва от силы тока и скорости подачи электродной проволоки показана на рис. 1, 2.

Анализ полученных уравнений показывает, что качество металла шва и сварных соединений можно контролировать и прогнозировать путем выбора соответствующих величин параметров режима сварки.

$$Y = 285,6645 - 0,004 * x - 0,0038 * y + 1,9087E-6 * x^2 - 3,3465E-6 * x * y + 2,39E-5 * y^2$$

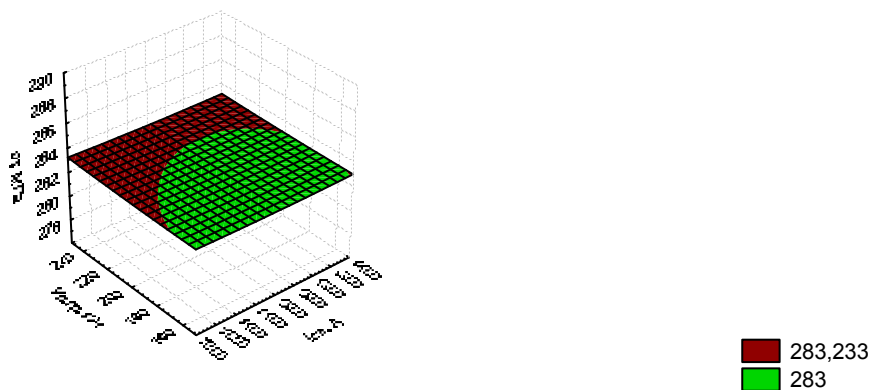


Рисунок 1 – Зависимость σ_T от силы тока и скорости подачи проволоки

$$Y = 32,1035 - 0,0038 * x + 0,018 * y + 1,9869E-6 * x^2 - 5,0061E-7 * x * y - 3,8375E-5 * y^2$$

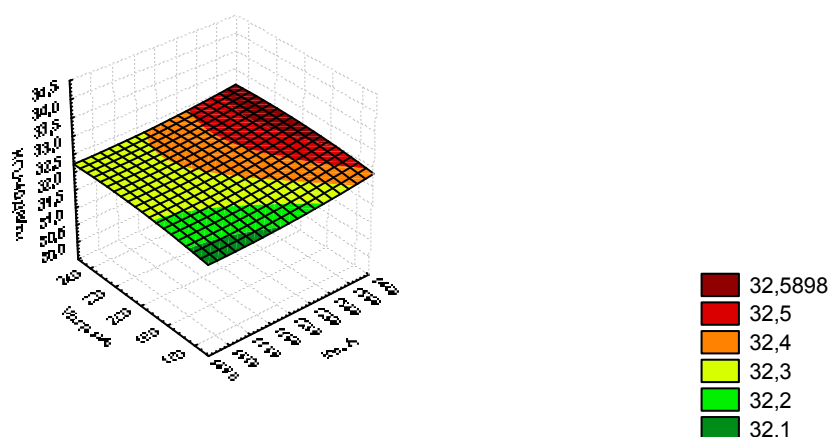


Рисунок 2 – Зависимость KCU_{40} от силы тока и скорости подачи проволоки

Выводы. Автоматическая 2-хдуговая сварка под флюсом толстолистового проката за один проход с применением присадочного гранулированного материала на предложенном режиме с последующим „термическим отдыхом” обеспечивает получение металла шва и сварного соединения с механическими свойствами практически равнопрочными основному металлу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Серенко А.Н., Патрикеев А.И., Шаферовский В.А., Пещерин И.Г. и др. Технико-экономическое сопоставление различных способов сварки толстолистового металла / Сварочное производство. – 1985. – № 12. – С.3-5.
2. Назарчук А.Т. Оптимизация параметров режима дуговой сварки в узкий зазор закаливаемых сталей без подогрева / Автомат. сварка. – 2003. – № 7. – С.40-43.
3. Серенко А.Н., Патрикеев А.И., Размышляев А.Д. и др. Особенности формирования шва при шагодуговой сварке толстолистового металла (с программированным режимом)/Сварочное производство. – 1984. – № 2. – С.19-22.
4. Стеклов О.И. Порошковые присадочные материалы в сварке плавлением. – М.: Высшая шк., 1984. – 48с.
5. Меркулов Б.А. Алгоритмы расчета на ЭВМ технологических параметров режима автоматической сварки под флюсом с дополнительной порошкообразной присадкой //Сварочное производство. – 1988. – № 7. – С.40-42.