

## ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ І НАДІЙНІСТЬ ЗВАРНИХ КОМБІНОВАНИХ БАЛОНІВ ВИСОКОГО ТИСКУ

<sup>1</sup>О.М. Савицький,<sup>2</sup> О.М. Мандрик,<sup>1</sup>М.М. Савицький

<sup>1</sup>Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України; 03680, м. Київ, вул. Боженко, 11, тел. (044) 2052321, e-mail: s a t @ p a t o n . u a

<sup>2</sup>ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42166, e-mail: i e f @ n u n g . e d u . u a

Розглянуто питання особливостей конструкції, забезпечення надійності та технології зварювання комбінованих балонів малої, середньої і великої місткості для газифікації автотранспорту та транспортування газу морським і сухопутним шляхом. Незалежно від ємкості і габаритів усі ці балони експлуатуються в умовах циклічних навантажень високим (до 20 МПа) тиском і призначені для накопичення, зберігання та транспортування природного газу.

Показано, що для виготовлення металевих корпусів вказаних балонів доцільно застосовувати високоміцні сталі з показниками міцності і пластичності  $\sigma_s=1000-1300$  МПа і  $\delta=12-16\%$ . При такому співвідношенні міцності і відносного подовження металу корпусу забезпечується оптимальне поєднання статичної міцності і циклічної довговічності балонів.

Для спрощення і здешевлення технологічного циклу виготовлення балонів, а також для забезпечення необхідної якості зварних з'єднань металевих корпусів необхідно застосовувати технології зварювання, які забезпечують зменшення тепловкладення у зварні з'єднання і керування структурою їх металу. До таких технологій відносяться процеси зварювання в захисних газах з активуючими флюсами.

Показано, що посилення циліндричної частини зварного металевого корпусу композитною оболонкою у співвідношенні до його товщини 1:1 в 2 рази підвищує статичну міцність балону і в 4 рази – його циклічну довговічність. При цьому забезпечується коефіцієнт запасу міцності на рівні 2,6 і циклічна довговічність 18000 циклів, що свідчить про високу надійність зварних комбінованих балонів.

Ключові слова: підсилююча оболонка, металевий корпус, високоміцні сталі, зварювання, зварні з'єднання.

Рассмотрены вопросы особенностей конструкции, обеспечения надежности и технологии сварки комбинированных баллонов малой, средней и большой емкости для газификации автотранспорта и транспортировки газа морским и сухопутным путем. Независимо от емкости и габаритов все эти баллоны эксплуатируются в условиях циклических нагрузок высоким (до 20 МПа) давлением и предназначены для накопления, хранения и транспортировки природного газа.

Показано, что для изготовления металлических корпусов указанных баллонов целесообразно применять высокопрочные стали с показателями прочности и пластичности  $\sigma_b = 1000-1300$  МПа и  $\delta = 12-16\%$ . При таком соотношении прочности и относительного удлинения металла корпуса обеспечивается оптимальное сочетание статической прочности и циклической долговечности баллонов.

Для упрощения и удешевления технологического цикла изготовления баллонов, а также для обеспечения необходимого качества сварных соединений металлических корпусов необходимо применять технологии сварки, которые обеспечивают уменьшение тепловложения в сварные соединения и управление структурой их металла. К таким технологиям относятся процессы сварки в защитных газах с активизирующими флюсами.

Показано, что усиление цилиндрической части сварного металлического корпуса композитной оболочкой в соотношении к его толщине 1:1 в 2 раза повышает статическую прочность баллона и в 4 раза - его циклическую долговечность. При этом обеспечивается коэффициент запаса прочности на уровне 2,6 и циклическая долговечность 18000 циклов, что свидетельствует о высокой надежности сварных комбинированных баллонов.

Ключевые слова: усиливающая оболочка, металлический корпус, высокопрочные стали, сварка, сварные соединения.

The paper deals with design features, reliability maintenance and technologies of welding the composite cylinders of small, medium and large capacity for the installation of gas service to vehicles and for offshore and onshore gas transportation. Regardless of the capacity and size these cylinders are operated under the circumstances of repeated stresses by high pressure (up to 20 MPa) and are designed for accumulating, storing and transporting natural gas.

It is proven that creating appropriate metal casings of cylinders requires the use of high-strength steel with the strength index of  $\sigma_b = 1000-1300$  МПа and ductility index of  $\delta = 12-16\%$ . This ratio of strength and specific elongation of the casing metal provides best configuration of static strength and cylinders cyclic life.

To simplify and reduce the costs of the technology cycle of constructing cylinders as well as to ensure a certain quality of weld joints of metal casings it is necessary to apply welding technologies that produce less heat input to the weld joints and architectural control of their metal. These technologies include the processes of gas-shielded welding with activating fluxes.

*This article states that the reinforcing of the cylindrical part of the welded metal casing with the composite shell at the ratio of 1:1 to its thickness increases the static strength of the cylinder by 2 times and its cyclic life by 4 times. This provides the safety factor of 2.6 and the cyclic life of 18,000 cycles that provide the high reliability of welded composite cylinders.*

Keywords: reinforcing shell, metal casing, high strength steels, welding, weld joints.

### Вступ

Сучасний світовий автопарк споживає більше половини нафти, яка видобувається і є основним забруднювачем (до 70%) навколишньої атмосфери. Враховуючи це, стійкою тенденцією розвитку сучасного автомобільного транспорту є підвищення екологічної чистоти двигунів внутрішнього згоряння. Ця проблема актуальна і для України.

Одним із напрямків підвищення екологічної чистоти автомобільного транспорту є заміна нафтового пального природним газом. Він може бути використаний як самостійно так і в суміші з бензинами або дизельним паливом. З точки зору екологічної безпеки природний газ має переваги, тому що не вимагає шкідливих технологій підготовки, а при згорянні в двигунах виділяє майже в два рази менше оксидів вуглецю та азоту, а також ароматичних вуглеводнів [1]. За енергетичним еквівалентом його розвідані запаси близькі до запасів нафти. Якщо ж урахувати вміст газу в гідратах, що залягають у вічній мерзлоті, на дні морів і океанів, його запаси обчислюють  $1015-1016 \text{ нм}^3$  [2].

Однак мала щільність газу при атмосферному тиску вимагає дооснащення автомобілів заправними ємностями – малогабаритними легкими балонами, які повинні експлуатуватись в умовах циклічних навантажень високим (до 20 МПа) тиском.

Для газифікації автотранспорту необхідно також забезпечити можливість безпроблемної заправки автомобілів стисненим газом. Це завдання може вирішуватись за двома напрямками. Перший – розширення мережі стаціонарних заправних станцій (АГНКС). Кількість таких станцій по Україні (державних і приватних) перевищує 280 одиниць. Другий напрямок передбачає випуск пересувних автогазозаправників (ПАГЗ) на базі вантажних автомобілів, залізничного транспорту (платформи) та річкових барж, які крім заправки транспортних засобів можуть забезпечувати ще й газифікацію населених пунктів, що розташовані на значних відстанях від газових магістралей та у місцях важкодоступних для будівництва трубопроводів. Для оснащення ПАГЗ також необхідні легкі балони високого тиску.

Україна не видобуває достатньо газу для всеохоплюючої газифікації і тому на перше місце виходить проблема доставки його з інших держав та регіонів.

Враховуючи вкрай нерівномірний розподіл газових родовищ, в останнє десятиліття інтенсивно розвивається спосіб доставки газу споживачам морським шляхом – танкерами-газовозами в зрідженому стані. Зважаючи на ряд істотних переваг зараз все більше звертають увагу на технологію КПП (компримованого – стиснутого природного газу). Вона більш прос-

та і менш енерговитратна. Для оснащення таких танкерів, особливо при поздовжній укладці балонів високого тиску, їх довжина може досягати десятків і навіть сотень метрів. Це дає змогу прирівняти їх до відтинків газогону і зменшити запас міцності до величини, встановленої для трубопроводів. Чим легші такі балони, тим більше газу зможуть перевозити танкери за один рейс при незмінній вантажопідйомності.

Будівництво таких танкерів для України особливо актуально через необхідність обслуговування офшорних свердловин в Чорному та Азовському морях і диверсифікації поставок газу з інших регіонів [3].

Таким чином, для України є актуальною задача розробки та дослідження працездатності в умовах циклічного навантаження високим тиском легких балонів малої, середньої та великої місткості. Крім того на світовому ринку ще не використовуються такі судна, але зацікавленість в них є. Тому освоєння такого виду продукції може стати прибутковою справою.

### Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень

У світовій практиці газифікації транспорту в якості заправних ємностей для автомобілів і ПАГЗ застосовуються три типи балонів: монометалеві; композиційні (пластикові); комбіновані.

Монометалеві балони, як правило, виготовляються із трубних безшовних заготовок шляхом завальцювання кінців. Необхідний рівень працездатності таких балонів в умовах циклічних навантажень високим тиском забезпечується за рахунок товщини стінки. Даний тип балонів має найвищий показник матеріалоемності, тобто відношення маси до корисного об'єму (M/V) виражений в кг/л. Якщо балони виготовляються із вуглецевих сталей M/V коливається в межах 1,8-2,0 кг/л. У випадку застосування для виготовлення балонів легованих термозміцнюваних сталей -  $M/V \approx 0,8-1,2$  кг/л.

Виробництво безшовних балонів з суцільнотягнутої трубної заготовки із вуглецевих і легованих сталей із завальцюванням донець освоєно на заводі ім. Ілліча (м. Маріуполь), та освоювалося на заводах "Прогрес" (м. Бердичів) та "Факел" (м. Фастів), але за відсутністю дешевих труб належної якості – слабо розвинуте. Основними проблемами цих виробництв є якість і вартість трубної заготовки. Гарячекатані труби, що випускаються в Україні, мають підвищену схильність до розшарування стінки. Це вимагає 100% ультразвукового контролю, а також підвищених допусків по товщині стінки. Остання обставина і потовщення металу при формуванні донець ускладнюють отримання балонів з відношенням маси до об'єму меншим 1,0.

Композиційні (пластикові) балони представляють собою конструкцію, яка складається із пластикового герметичного корпусу і закладних деталей. Герметичні корпуси таких балонів виготовляються із поліетилену з високою щільністю і зміцнюються намоткою волоконними матеріалами, з яких формують посилюючу оболонку типу «кокон», а для присіднання вентилів та арматури використовуються закладні деталі. Працездатність композиційних балонів в умовах циклічних навантажень високим тиском забезпечується в основному посилюючою оболонкою.

Такі балони мають низьку металоємність ( $M/V \approx 0,26-0,30$  кг/л), але вони надто дорогі в ціні (12-25\$ за літр об'єму), оскільки вимагають застосування у виробництві дороговартісного обладнання з низькими показниками продуктивності.

Комбіновані металопластикові балони також представляють собою конструкцію з герметичним, але металевим корпусом, також посиленим зміцнюючою оболонкою на основі волоконних матеріалів. Ці балони із зміцнюючою оболонкою типу кокон виготовляються із сталевими або алюмінієвими корпусами і забезпечують  $M/V \approx 0,5-0,8$  кг/л. Головним несучим елементом, який сприймає робочі навантаження служить композиційна оболонка, що дає можливість подальшого зниження маси балону за рахунок зменшення товщини стінки металевого корпусу, зберігаючи за ним тільки функцію забезпечення герметичності. Однак для формування оболонки типу «кокон», як і в попередньому випадку, необхідне спеціальне дороге обладнання. А зменшення товщини сталевих корпусу пов'язане з необхідністю збільшення товщини оболонки і, відповідно, тривалості періодів її сушіння і полімеризації.

Більш технологічною є конструкція комбінованих балонів, в якій основним несучим елементом став корпус, а оболонка зміцнює тільки його циліндричну частину. Для цього необхідно збільшити міцність сталевих корпусу за рахунок підвищення міцності сталі і застосувати напівсферичні штамповані днища, в яких максимальні напруження в два рази нижчі кільцевих у циліндрі. Посилююча оболонка формується рядною кільцевою намоткою, що дає змогу спростити та здешевити технологію і обладнання. Балони такого типу мають відкриті денця і забезпечують  $M/V \approx 0,6-0,7$  кг/л.

Для зменшення напружень в стінках, денця мають бути напівсферичними, що, як свідчить практичний досвід, важко досягти завальцюванням тонкостінної обичайки через утворення гофрів. Тому більш технологічним є штампування денця із листової сталі із подальшим зварюванням їх з обичайкою.

На сучасному етапі економічного, технологічного і технічного розвитку України, найбільш оптимальним типом балонів для газифікації транспорту і створення ПАГЗ є комбіновані балони. Ця конструкція забезпечує найоптимальніше поєднання ціни, якості і співвідношення  $M/V$ .

При оснащенні танкерів-газовозів використовуються дві основні схеми розташування балонів: вертикальна і поздовжня (горизонтальна).

При вертикальній схемі - максимальна довжина балону обмежується висотою борта судна і становить 24 м. У цьому випадку відповідно до встановлених нормативів коефіцієнт запасу міцності для балону повинен становити  $K_3=2,5$ .

При поздовжньому розташуванні балонів їх довжина може досягати кількох сотень метрів. Такі балони ідентичні коротким трубопроводам. Для них коефіцієнт запасу міцності зменшується до 1,4. Берегова служба США обмежила цю величину 1,75. Це дає змогу зменшити товщину стінки корпусу, що, в свою чергу, забезпечує збільшення на 34-37% об'єм вантажної системи і, відповідно, кількості газу, що може перевозитись за один рейс. Експлуатаційні витрати на транспортування газу зменшуються у 1,3-1,5 рази.

Більшість розробників газовозів, незалежно від схеми розташування балонів, орієнтуються на використання заготовок газових труб. Для цього, як правило, передбачається використання труб серійного виробництва, оскільки морський газовоз може вміщувати до 100 км труб. Оскільки необхідно враховувати, що показники міцності сталі, з якої виготовлено трубні заготовки, мають безпосереднє відношення до маси і об'єму вантажної системи. Порівняння трубних сталей підвищеної міцності типу Х70 і високоміцних типу 30ХГСА свідчить, що оснащення газовозу балонами із високоміцної сталі кількість перевезеного за один рейс газу збільшується на 30%. При цьому експлуатаційні витрати зменшуються в 1,3-1,5 рази.

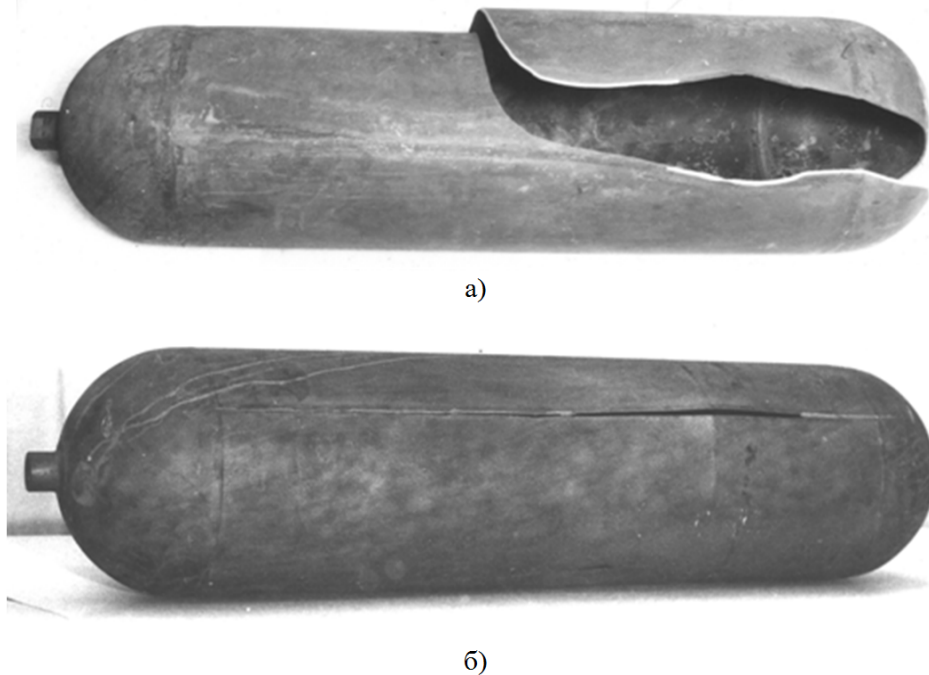
Наступним резервом підвищення ефективності використання танкерів-газовозів є застосування комбінованих балонів зі сталевим корпусом, зміцненим композитною оболонкою. Використання їх забезпечує збільшення перевезень в 1,6 рази і зменшення у 1,5 рази експлуатаційних витрат газу, порівняно із газовозами оснащеними суцільнометалевими балонами.

Таким чином, для підвищення ефективності транспортування газу КПП танкерами-газовозами їх доцільно оснащувати довгомірними комбінованими балонами із високоміцних сталей за поздовжньою схемою. Поки що на морських лініях такі судна не працюють, але в активах суднобудівельних фірм США, РФ, Норвегії, Канади вже є.

### Невирішені раніше частини проблеми

Вищенаведені факти свідчать про перспективність використання комбінованих балонів із високоміцних сталей для транспортування газу морським (танкери-газовози) і сухопутним шляхом (ПАГС), а також для оснащення автомобілів заправними ємностями. Однак це пов'язано з певними проблемами.

В Україні не має постійно діючого серійного виробництва якісних безшовних труб із високоміцних сталей малих і тим більше вели-



*а - при статичному навантаженні;  
б - при циклічному навантаженні*

**Рисунок 1 – Характер руйнування зварних корпусів балонів високого тиску**

ких діаметрів. Тому циліндричну частину балонів доцільно формувати із листа з наступним зварюванням. Однак усі комбіновані балони об'ємом до 100 л із зварною обичайкою (циліндричною частиною) за міжнародними правилами рекомендується закривати посилюючою оболонкою типу «кокон». Для малогабаритних балонів, що використовуються в автомобільному транспорті ця проблема має певні рішення. Значно складніше її вирішувати при середній довжині балонів для транспортування газу сухопутним шляхом, і практично неможливо – при виробництві балонів для оснащення танкерів газозовів. Всі труби діаметром більше 375 мм формуються із листового прокату, мають поздовжні зварні шви і довжину не менше 12м. Тому загорнути в «кокон» газові труби великих діаметрів неможливо.

#### **Мета і задачі статті**

З урахуванням наведеного, метою даної роботи було визначення працездатності конструкції зварних балонів із зміцненою зварною циліндричною частиною, а також факторів, які визначають їх працездатність і надійність.

Для досягнення вказаної мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- визначити як залежить працездатність металевих корпусів від співвідношення міцності і пластичності металу;
- оцінити вплив зміцнення зварної циліндричної частини балону композиційним матеріалом на його статичну міцність і циклічну довговічність;
- розробити основні технологічні принципи конструювання балонів в залежності від їх розмірів і призначення.

**Методи досліджень:** статистичний аналіз експериментальних даних, отриманих на моделях балонів та зварних з'єднаннях високоміцних сталей.

#### **Основний матеріал досліджень**

Таким чином, першим етапом дослідження було визначення надійності і працездатності зварних металевих корпусів балонів, які виготовлялись із високоміцних середньолегованих сталей. Результати цих досліджень засвідчили, що при статичному навантаженні корпусу внутрішнім тиском, їх руйнування не пов'язано із зварним з'єднанням (рис. 1, а). Воно розпочинається, як правило, в ділянках балона з місцевим потоншенням стінки. Руйнування корпусу при циклічних навантаженнях, більше пов'язано із зварним з'єднанням. Найчастіше воно відбувалося в ділянці, яка безпосередньо прилягає до шва (рис. 1,б). Це ділянка в якій відбувається сплавлення основного металу і металу зварного шва. В ній розвивається підвищена хімічна неоднорідність і перегрів металу. При цьому в металі формуються структури з високою твердістю і міцністю, та низькою пластичністю і в'язкістю. Це забезпечує високу стійкість зварних з'єднань при статичному навантаженні і надзвичайно низьку – при циклічному.

Сучасні середньолеговані високоміцні сталі, типу 30ХГСА, 30ХМА та 30ХГСН2А, які використовуються для міцних легких виробів у різних галузях техніки, що працюють при високих статичних, динамічних та циклічних навантаженнях, в залежності від хімічного складу та режимів термічної обробки можуть мати міцність в межах 600-2300МПа [4]. При цьому їх мікроструктура змінюється від перліту до мар-

тенситу, а частіше складається з конгломерату фаз. Із збільшенням частки мартенситної складової в структурі міцність сталей підвищується, а пластичність знижується. При статичних навантаженнях це забезпечує необхідну працездатність і довговічність конструкції. Але при змінних, з малим числом циклів, навантаженнях (до  $10 \times 10^6$ ) опір втомному руйнуванню різко падає. Для досягнення необхідної довговічності конструкцій із високоміцних сталей, особливо при циклічному навантаженні, співвідношення міцності і пластичності необхідно зм'якшувати в сторону збільшення пластичної складової. Зазвичай це досягається за рахунок відпуску.

На рис. 2 наведено дані, які дозволяють оцінити вплив температури відпуску на співвідношення міцності і пластичності перерахованих вище сталей. Всі три діаграми свідчать, що в міру підвищення температури відпуску для всіх трьох сталей 30ХГСА, 30ХМА та 30ХГСН2А показник міцності ( $\sigma_b$ ) поступово зменшується, а показник пластичності ( $\delta$ ) зростає.

На всіх трьох діаграмах криві залежностей міцності і відносного подовження ( $\delta$ ) перетинаються за температури відпуску  $500^\circ\text{C}$ . При цьому показники міцності сталі коливаються в межах 1200-1280 МПа, а показники пластичності – 15-16%. Ці дані дуже добре корелюють з результатами випробувань зварних балонів на опір малоциклової втомі. Нами встановлено, що для забезпечення циклічної довговічності зварних балонів зміцнених композитом, на рівні 15000-20000 циклів, необхідно забезпечити міцність металу корпусу на рівні 1000-1300 МПа при пластичності в межах 12-16%. При цьому статична міцність балонів забезпечується на рівні  $2,6P_p$ , де  $P_p$  – робочий тиск у 20 МПа.

Наведені дані отримані при співвідношенні товщини стінки корпусу і зміцнюючої композитної оболонки 1:1.

Таким чином, точка перехрещення кривих міцності і пластичності на рис. 2 відповідає оптимальному їх співвідношенню для забезпечення необхідних показників статичної міцності і циклічної довговічності зварних балонів із композитним зміцненням циліндричної частини у співвідношенні 1:1.

З наведених на рис. 2 даних, видно, що зі збільшенням температури відпуску, коли міцність сталей знижується, а відносне подовження підвищується. В структурі металу зростає частка більш пластичних складових.

Це пояснює те, що руйнування металевих корпусів балонів при традиційних способах зварювання відбувається в ділянках, де утворюються грубозернисті структури мартенситного типу (рис. 3) внаслідок місцевого перегріву і загартування металу на повітрі. Такі структури характеризуються мінімальними пластичністю і в'язкістю при високих твердості і міцності. Це призводить до передчасного вичерпання запасу пластичності і утворення у званих з'єднаннях тріщин та крихкого руйнування.

Традиційні методи подолання вказаних труднощів передбачають перш за все оптимізацію структури металу за рахунок післязварювальної термічної обробки – нормалізації, зняття залишкових напружень за рахунок відпуску або підігріву зварного з'єднання, що також сприяє розвитку процесів аналогічних до відпуску внаслідок уповільнення охолодження. Однак ці методи вимагають додаткових трудо- та енерговитрат, застосування додаткового громіздкого та дорогого обладнання, що призводить до різкого подорожчання технологічного циклу виготовлення балонів.

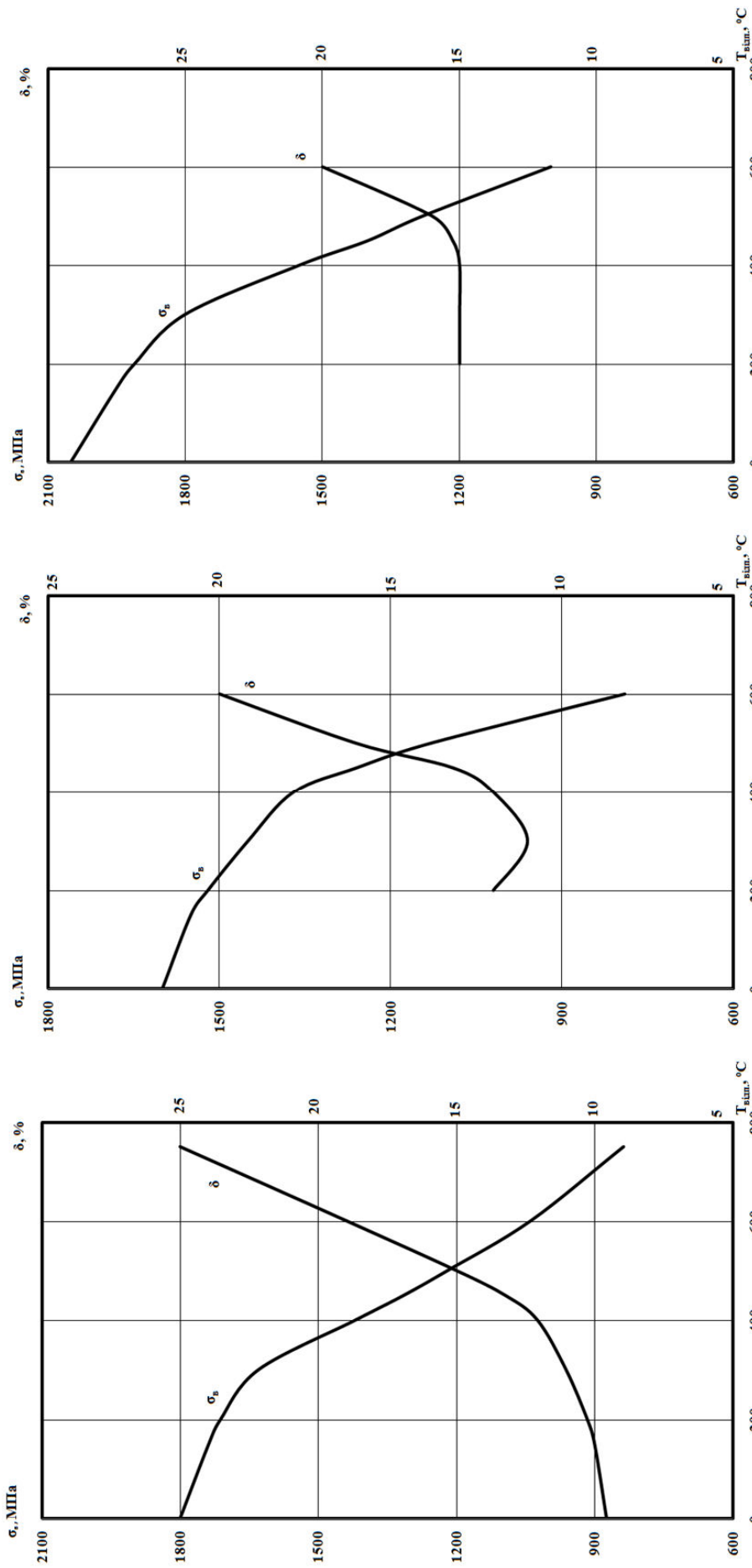
Альтернативою вказаним є методи керування процесами структуроутворення в зварних з'єднаннях в процесі їх виконання, засновані на швидкісних нагрівах зварних з'єднань [5, 6].

При нагріванні металу в процесі зварювання з швидкостями, що перевищують  $500^\circ\text{C}/\text{c}$  температури критичних точок  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$  зміщуються в область високих температур (рис. 4). Це різко скорочує перебування металу в температурному інтервалі гомогенізації аустеніту. В результаті зниження гомогенності аустеніту, його розпад при охолодженні зміщується в область більш високих температур, де відбувається утворення більш пластичних складових структури або самовідпуск крихких.

На рис. 5 зображено термодинамічну діаграму розпаду переохолодженого аустеніту в зварному з'єднанні сталі 30ХГСА, метал якого під час зварювання нагрівався до максимальної температури  $1250^\circ\text{C}$  з середніми швидкостями  $680^\circ\text{C}/\text{c}$  і  $734^\circ\text{C}/\text{c}$ . Криві охолодження, позначені на термодинамічній діаграмі (рис. 5) 1 та 2, свідчать, що у цьому випадку перетворення переохолодженого аустеніту починається в бейнітній області. Тут розпадається до 50% аустеніту, а закінчується розпад в мартенситній, де також розпадається до 50% переохолодженого аустеніту, проте при підвищеній температурі. В результаті - в металі зварних з'єднань сформувалась бейнітно-мартенситна структура (50% бейніту + 50% мартенситу) (рис. 6). Такі структури, як правило, характеризуються поєднанням достатньо високих показників міцності і пластичності. Це забезпечує високу стійкість металу проти утворення тріщин, крихкого та уповільненого руйнувань, а також високий опір втомному руйнуванню в умовах циклічних навантажень.

Результати більш ранніх досліджень [7] свідчать, що в міру підвищення швидкостей нагріву металу при його зварюванні розпад переохолодженого аустеніту поступово зміщується в області більш високих температур, де формуються структури, що характеризуються високою пластичністю.

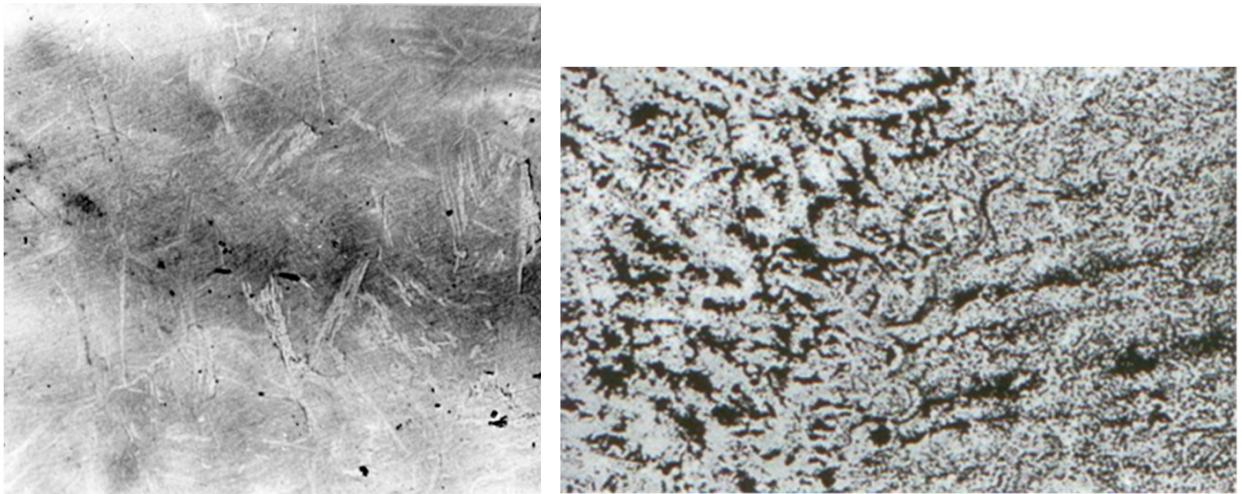
Таким чином, регулювання швидкостей нагріву при зварюванні високоміцних сталей дає змогу цілеспрямовано керувати формуванням структури в металі зварних з'єднань і забезпечувати ідентичність структури основного металу та металу зварних з'єднань, що забезпечує їх рівномірність.



а) 30ХГСА; б) 30ХМА; в) 30ХГН2А

Рисунок 2 – Вплив температури відпуску на показники міцності і пластичності середньолегованих високоміцних сталей



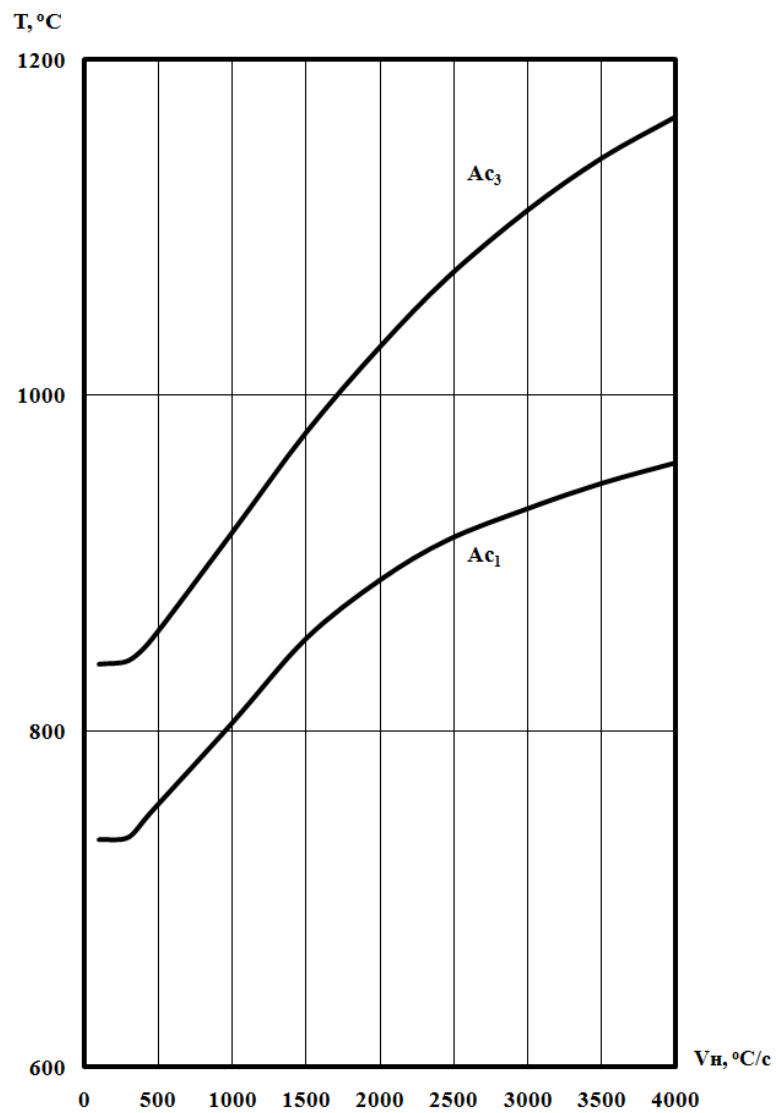


а)

б)

а) мартенситна структура 100%;  
б) структура з переважачим вмістом мартенситу

**Рисунок 3 – Структури мартенситного типу**



**Рисунок 4 – Область зростання температур критичних точок  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$  залежно від швидкості нагріву металу для сталей з вмістом вуглецю 0,2 – 0,8%**

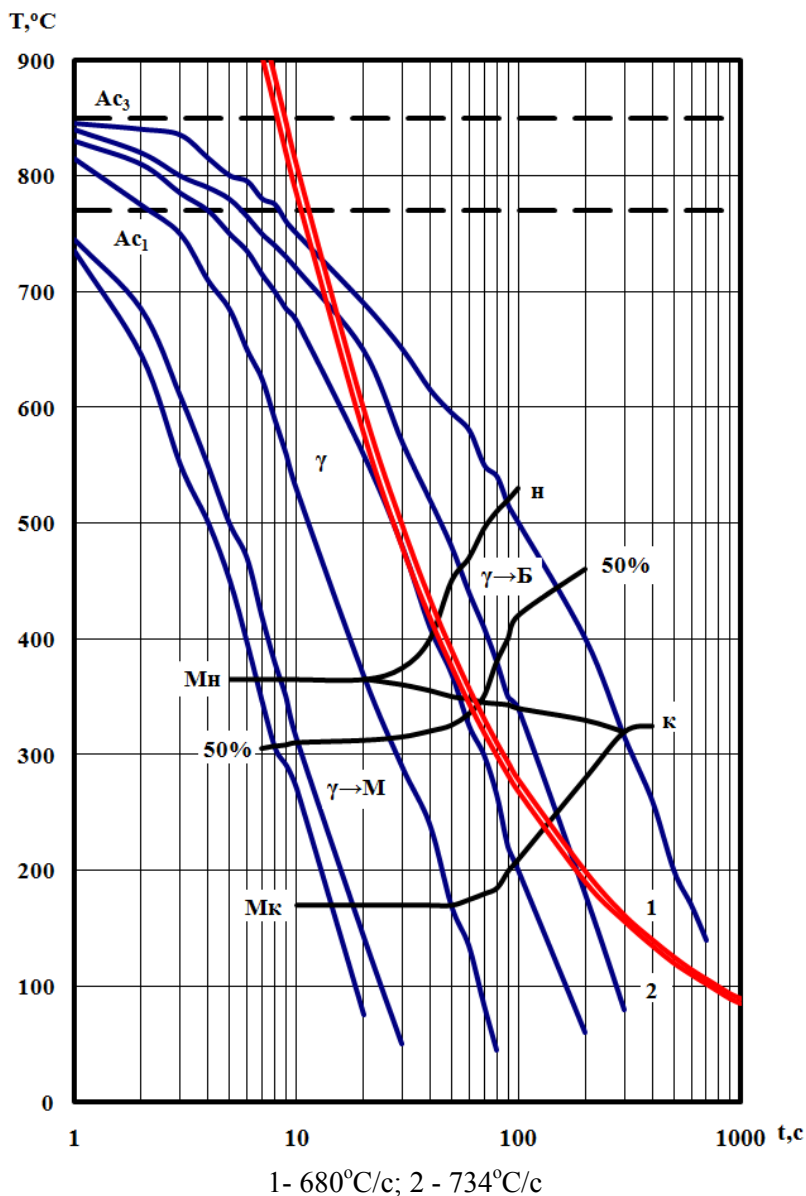
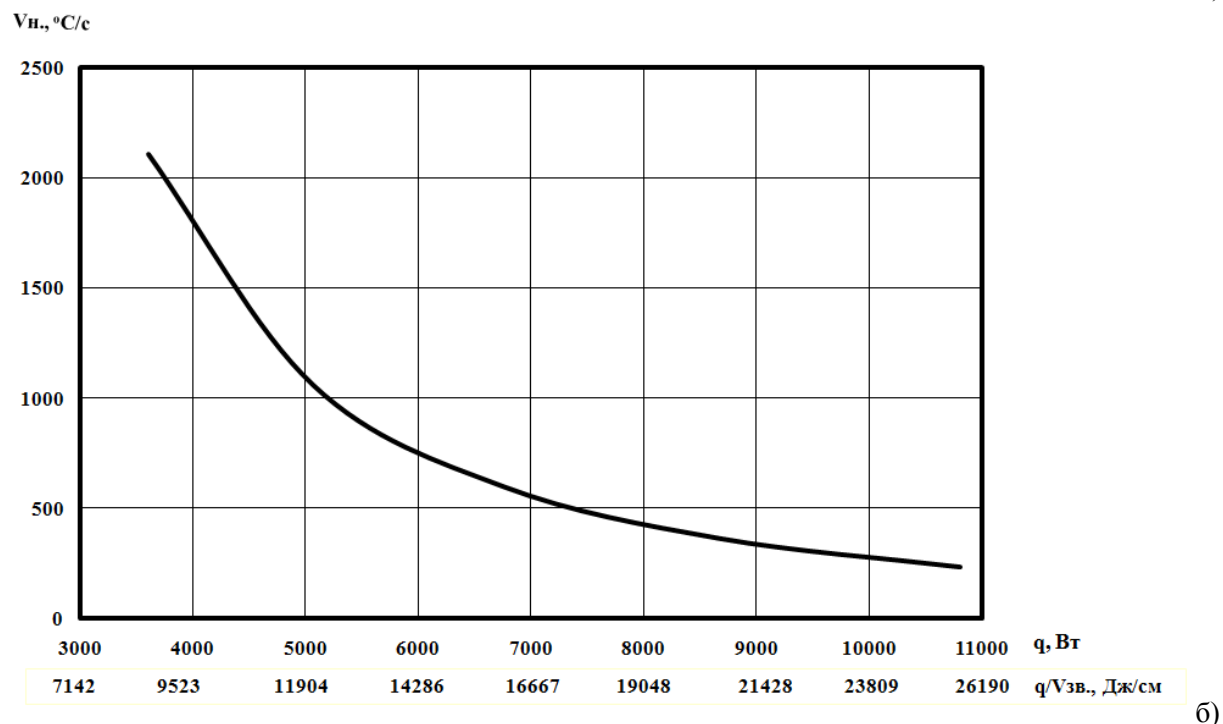
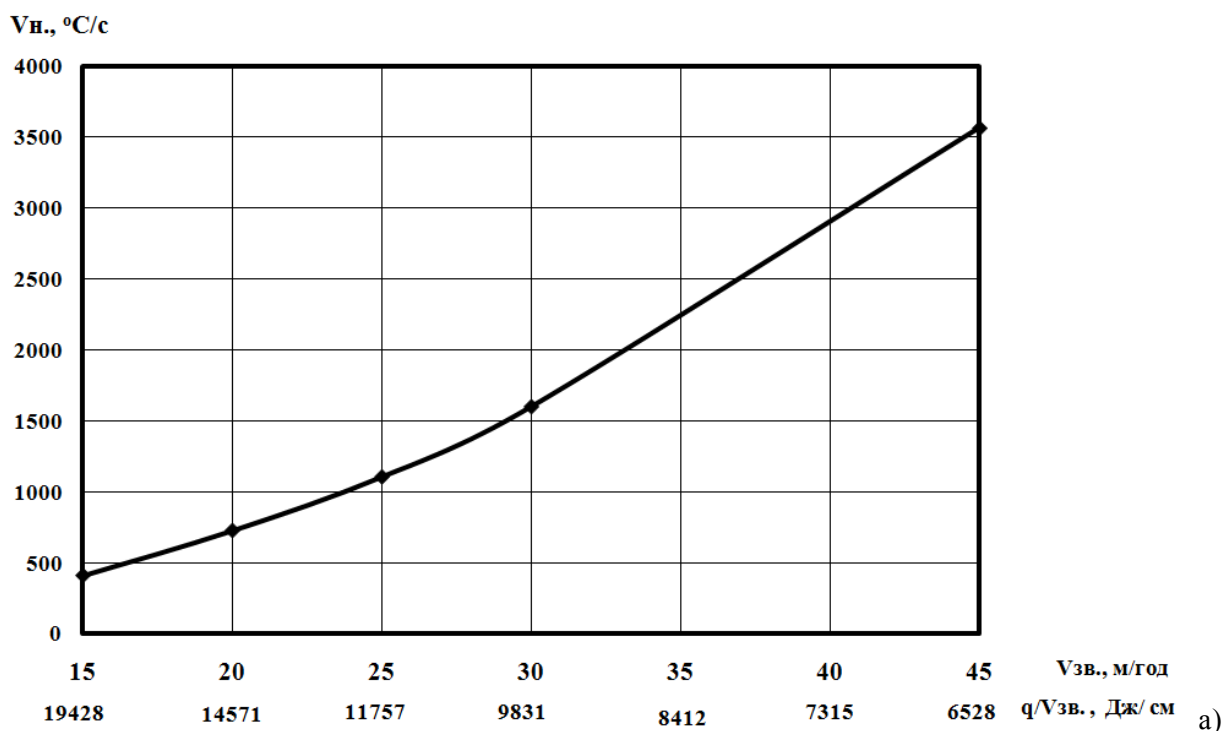


Рисунок 5 – Термокінетична діаграма перетворення переохолодженого аустеніту в зварних з’єднаннях сталі 30ХГСА, які в процесі зварювання нагрівались зі швидкостями



Рисунок 6 – Мікроструктура зварного з’єднання сталі 30ХГСА з вмістом бейніту і мартенситу приблизно 50%х50%



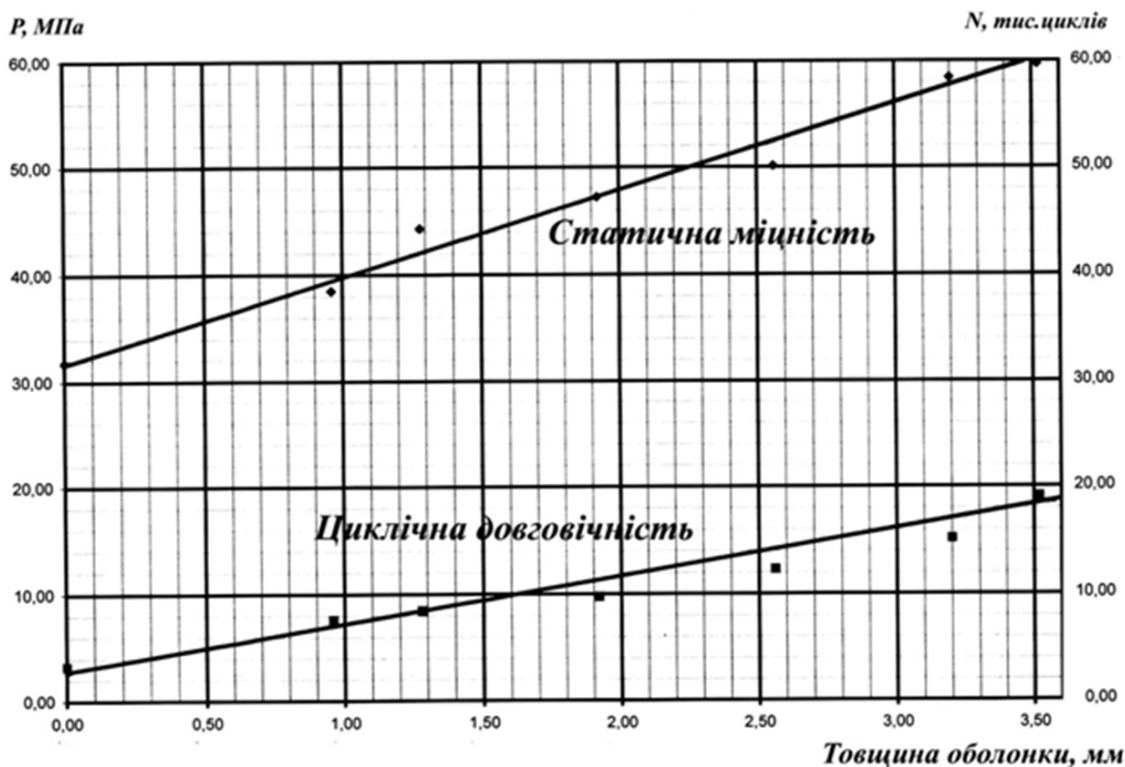


а) вплив швидкості зварювання;  
б) вплив теплової потужності дуги

**Рисунок 7 – Вплив погонної енергії зварювання на швидкості нагріву металу зварного з'єднання**

Регулювання швидкостей нагріву металу в зварному з'єднанні здійснюється за рахунок збільшення або зменшення погонної енергії ( $q/V_{зв.}$ ) [7]. Вона обчислюється як відношення теплової потужності дуги –  $q$  до швидкості зварювання –  $V_{зв.}$  [8] і визначає тепловкладення у зварне з'єднання в процесі його виконання. На рис. 7 зображено криві, які свідчать, що всяка зміна теплової потужності дуги і швидкості

зварювання спрямовані на зменшення погонної енергії, супроводжуються підвищенням швидкостей нагріву металу і навпаки. Ці дані свідчать, що при дуговому зварюванні для досягнення швидкостей нагріву, достатніх для впливу на процеси структуроутворення в зварних з'єднаннях, погонну енергію необхідно зменшувати до рівня, коли виконання якісного з'єднання стає проблематичним. Крім цього,



**Рисунок 8 – Вплив товщини композитної підсилюючої оболонки на статичну міцність і циклічну довговічність зварних балонів високого тиску**

зменшення погонної енергії негативно впливає на продуктивність зварювання, зменшуючи її. Вирішити проблему зменшення погонної енергії при зварюванні в захисних газах дають можливість активуючі флюси (АТІГ та АМІГ процеси). Вони забезпечують стиснення дуги і збільшення в 2-4 рази її проплавляючої здатності без збільшення зварювального струму. Аналогічно відбувається зменшення погонної енергії, порівняно з традиційними способами зварювання в захисних газах, при зварюванні металу однакової товщини [9]. Крім цього, застосування активуючих флюсів при зварюванні в захисних газах плавким і неплавким електродами різко покращує екологічні показники цих процесів [9].

З урахуванням наведених технологічних можливостей і екологічних показників, для зварювання металевих корпусів балонів застосовувалось зварювання з активуючими флюсами. Практичний досвід, набутий в галузі створення зварних балонів високого тиску, свідчить, що їх надійна і довговічна робота досягається при забезпеченні рівномірності зварних з'єднань і основного металу. Однак, подальші дослідження свідчать, що забезпечити високу циклічну стійкість балону за рахунок одного лише тонкостінного металевого корпусу, хоча і виконаного із високоміцної сталі, не вдалося. Максимальна кількість циклів, яку витримував такий балон не перевищувала 4500-5000. Підвищення міцності корпусу і зменшення його пластичності за рахунок термообробки супроводжувалось зменшенням кількості циклів навантаження. Щоб посилити циклічну довговічність металевих

корпусів, необхідно було зменшувати міцність металу, підвищувати показники його пластичності та одночасно збільшувати товщину корпусу. А це призводить до збільшення показника  $M/V$ .

Вирішити проблему можна, якщо посилити циліндричну частину балонів композиційною оболонкою. На рис. 8 зображено залежності статичної міцності і циклічної довговічності балонів з товщиною металевого корпусу 3,5 мм в залежності від товщини підсилюючої композитної оболонки. Ці дані свідчать, що в міру зростання товщини підсилюючої композитної оболонки зростають і показники працездатності балонів. Посилююча оболонка товщиною 3,5 мм в два рази підвищує статичну міцність балонів і більше ніж в 4 рази - його циклічну довговічність. При цьому посилюючою оболонкою зміцнена лише циліндрична частина балонів.

Наведені дані свідчать, що забезпечення надійності і працездатності зварних балонів високого

тиску із високоміцних сталей починається іще на стадії зварювання їх корпусів. По-перше, при зварюванні необхідно формувати в з'єднаннях структуру ідентичну, або близьку до структури основного металу, що забезпечить їм однакові показники міцності і пластичності в межах  $\sigma_b = 1000-1300\text{МПа}$  і  $\delta = 12-16\%$ . Наступним етапом в забезпеченні надійності і працездатності балонів є формування на їх циліндричній частині посилюючої композиційної оболонки. Це, як свідчать результати випробувань на статичну міцність і стійкість проти малоциклової втоми, забезпечує їх працездатність.

Результати досліджень, отримані на моделях та реальних легких малогабаритних балонах справедливі і для балонів середньої і великої довжини. Відрізняються лише технологічні цикли їх виготовлення, де повинна забезпечуватись рівномірність металу зварних з'єднань і основного металу.

Технологічний цикл виготовлення малогабаритних легких балонів та балонів середньої довжини в межах однієї труби (12 м) включає наступні основні етапи:

- виготовлення зварного металевго корпусу;
- термічна обробка зварного металевго корпусу;
- формування композитної підсилюючої оболонки на циліндричній частині балону;
- термічна полімеризація композитної підсилюючої оболонки.

Всі ці етапи виконуються в заводських умовах.

При виготовленні довгомірних балонів для оснащення морських газозовів, маса яких сягає декількох тон, а довжина десятків та сотень метрів доцільно застосувати блочний принцип їх побудови. Можливості транспортних засобів також обмежують габарити конструкції при доставці на об'єкт експлуатації, тому їх необхідно монтувати безпосередньо на об'єкті.

В цьому випадку найбільш раціонально технологічну схему виготовлення виробу розбити на такі основні етапи.

1. В заводських умовах на окремих секціях (труби довжиною 11,5-12,5 метрів) формується композитна підсилююча оболонка. При цьому торці труб не намотують на ширину зони термічного впливу, яка створюється при зварюванні секцій конструкції між собою, враховуючи зону необхідної для встановлення зварювального обладнання.

2. Полімеризація композитної підсилюючої оболонки цих секцій проводиться також у заводських умовах, у серійних печах для термообробки великогабаритних виробів.

3. Транспортування окремих 12-метрових секцій до місця монтажу.

4. Зварювання окремих секцій між собою.

5. Після зварювання секцій, на локальному відрізку в зоні зварного кільцевого стику формується підсилююча оболонка-бандаж, яка полімеризується в монтажних умовах з використанням роз'ємних печей муфтового типу.

Для зварювання окремих секцій між собою доцільно застосовувати орбітальне зварювання. При цьому також необхідно враховувати той факт, що металева основа секцій виготовляється із високоміцних сталей, а композитна оболонка на секціях сформована із нетермостійкого матеріалу і при перевищенні температури 200°C вигоряє і руйнується. Тому після зварювання стик не повинен підлягати термообробці для коригування структури та властивостей металу зварного з'єднання. Формування структури і властивостей повинно забезпечуватись в процесі виконання стику. Крім цього при зварюванні необхідно забезпечити цілісність і

працездатність підсилюючих оболонок секцій, які зварюються. Тобто для зварювання секцій необхідно застосовувати способи зварювання, які забезпечують низьке тепловкладення в зварне з'єднання і малі розміри зони термічного впливу.

Формування оболонки-бандажу в зоні кільцевого шва повинно здійснюватись в умовах, коли обертання балону неможливе через його масу та габарити. Тому бандаж формується орбітальною намоткою. Для реалізації даного процесу розробляється спеціалізоване обладнання. На сьогодні визначено основні принципи побудови такого обладнання, його склад та розроблено тримірні моделі комплексу обладнання в цілому і окремих його вузлів і механізмів.

Таким чином, для з'єднання секцій середньо- і великогабаритних балонів необхідно застосовувати способи зварювання та зміцнення, які забезпечують можливість керування структуроутворенням і формуванням властивостей комбінованих з'єднань з одночасним зменшенням або регулюванням тепловкладення. Таким вимогам відповідає зварювання в захисних газах з активуючими флюсами, місцева термічна обробка та полімеризація.

## Висновки

1. Для виготовлення зварних металевих корпусів комбінованих балонів застосовуються високоміцні сталі і скловолокно із  $\sigma_b \geq 1000 \text{ МПа}$ .

2. Встановлено, що оптимальне поєднання статичної міцності і циклічної довговічності зварних комбінованих балонів досягається при міцності металу корпусу  $\sigma_b = 1000-1300 \text{ МПа}$  і  $\delta = 12-16\%$ .

3. При виготовленні зварних комбінованих балонів із високоміцних сталей доцільно застосовувати технології зварювання, що забезпечують низьке тепловкладення та можливість регулювання структури зварних з'єднань для досягнення їх рівномірності з основним металом.

4. Посилення циліндричної частини балону композитною оболонкою на основі неметалевих волокон в два рази підвищує його статичну міцність і в 4 рази – циклічну довговічність.

5. Посилення циліндричної частини зварних корпусів балонів із високоміцних сталей композитною оболонкою у співвідношенні до товщини металу 1:1 забезпечує їм коефіцієнт запасу міцності 2,6 і циклічну працездатність не менше 18000 циклів, що є основними показниками їх надійності.

6. Перспективним напрямком розвитку конструкції балонів високого тиску є комбінація сталевих матеріалів з різними рівнями міцності із зміцнюючої композитної оболонки та корпусу, що дасть змогу відмовитись від загартовування великогабаритних елементів.

Література

- 1 Метан – топливо века! [www.neoplan.ru/news/Metan](http://www.neoplan.ru/news/Metan) - 16.05.2012
- 2 Стан і перспективи розвитку нафтогазового комплексу України / Каплін І.М., Єгер Д.О., Зарубін Ю.О. та ін. – К.: Наукова думка, 2006 – 305 с.
- 3 Енергетична стратегія України на період до 2030 року: схвалена розпорядженням КМУ від 15.03.2006 р. №145-р. -К. 2006. – 129 с.
- 4 Марочник сталей и сплавов / Под ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
- 5 Савицкий А.М. Влияние стадии нагрева на формирование структуры сварных соединений закаливаемых сталей / А.М. Савицкий, В.Г. Васильев, М.М. Савицкий, В.Н. Ващенко // Автоматическая сварка. – 2005. – №1. – С. 19 – 21.
- 6 Савицкий О.М. Вплив швидкісних нагрівів на структуру вуглецевих сталей при локальній термічній дії / О.М. Савицький // Металознавство та обробка металів. – 2005. - №4. – С. 33 – 35.
- 7 Савицький О.М. Особливості впливу швидкостей нагріву і охолодження на структуру вуглецевих сталей при локальній термічній дії / О.М. Савицький, В.М. Ващенко, Ю.М. Шкрабалюк // Металознавство та обробка матеріалів. – 2011. – №3. – С. 26 - 31.
- 8 Рыкалин Н.Н. Тепловые процессы при сварке плавлением / Н.Н. Рыкалин, А.И. Пугин. – М.: Профиздат, 1959. – 96 с.
- 9 J. Niagaj, M.M. Savytskyj, O.M. Savytskyj The influence of activation on technological and ecological properties of welding arc under argon shield during welding of low- and high alloy steels. Biuletun instytutu spawalnictwa w gliwicach., №1, 2008, p.46-50.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
08.05.13*

*Рекомендована до друку  
професором Шлапаком Л.С.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
д-ром техн. наук Скульським В.Ю.  
(Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона  
НАН України, м. Київ)*