



ПОЗНЯКОВ
Валерій Дмитрович –
член-кореспондент НАН України,
доктор технічних наук,
завідувач відділу зварювання
легованих сталей Інституту
електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України

ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ І РЕМОНТУ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ

За матеріалами наукової доповіді на засіданні
Президії НАН України 23 листопада 2016 року

У доповіді розглянуто результати наукових досліджень з вивчення впливу характерних для дугового зварювання термічних циклів на формування структури, а також на механічні властивості та опір втомі й крихкому руйнуванню зварних з'єднань із високоміцних конструкційних сталей з границею плинності 350–800 МПа. Наведено приклади практичного використання розроблених за результатами цих досліджень технологій зварювання, які застосовуються при виготовленні і ремонті машин, механізмів та інженерних споруд тривалого терміну експлуатації.

Ключові слова: дугове зварювання, структура металу, механічні властивості, холодні тріщини, крихке руйнування, опір втомі.

Однією з головних проблем сучасного технічного розвитку є необхідність підвищення техніко-економічних показників машин, механізмів та інженерних споруд завдяки зниженню їх питомої металомісткості, збільшенню експлуатаційної надійності та довговічності. У її вирішенні важливу роль відіграє широке застосування в будівництві і машинобудуванні зварних металевих конструкцій з *високоміцних сталей*, до яких, за міжнародною класифікацією, належать сталі, що мають границю плинності 350 МПа і більше.

За призначенням розглянуті в доповіді високоміцні сталі можливо умовно поділити на дві групи: *низьколеговані конструкційні сталі* з границею плинності ($\sigma_{0,2} = 350\text{--}490$ МПа) та *леговані конструкційні сталі* з $\sigma_{0,2} = 590\text{--}800$ МПа.

Низьколеговані конструкційні сталі та сфери їх застосування

До низьколегованих високоміцних конструкційних сталей належать сталі класу міцності С355–С490. Зазвичай такі сталі

леговані марганцем, містять обмежену, до 0,5% концентрацію кремнію та до 0,15% вуглецю. Інколи до їх складу вводять невелику кількість нікелю та хрому. Низьколеговані високоміцні сталі використовують переважно в мостобудуванні, при виробництві резервуарів для зберігання і переробки газу та нафти, у крано-, вагобудуванні, при виготовленні будівельних конструкцій тощо.

До недавнього часу при виготовленні зазначених виробів широко застосовували низьколеговані сталі, які мають границю плинності 350–390 МПа. До таких сталей належать сталі марок 09Г2С, 17Г1С, 10ХСНД і 15ХСНД, які були розроблені ще за часів СРСР та виготовлялися відповідно до чинних на той час стандартів.

Однак інтенсивна інтеграція вітчизняної промисловості у світову економіку зумовила необхідність перегляду стандартів щодо оцінки якості сталей. У зв'язку з цим виникла потреба в модернізації і в створенні нових сталей, що дають змогу задовольнити постійно зростаючі вимоги виробництва. Як результат, останніми роками було розроблено та освоєно вітчизняними металургійними комбінатами виробництво нових високоміцних сталей класу міцності С440–С490. Яскравими представниками таких сталей є мікролеговані сталі марок 06Г2Б та 10Г2ФБ [1]. Виготовляють їх за вітчизняними та міжнародними стандартами, а їхні механічні властивості повністю відповідають європейським нормам.

Як правило, сучасні низьколеговані сталі містять також марганець і кремній. Проте на відміну від зазначених вище сталей вони додатково мікролеговані окремо або в поєднанні ванадієм, алюмінієм, ніобієм чи церієм. Ця оптимізація технології виробництва сталей (контрольований прокат, прискорене охолодження, термічна обробка) сприяє формуванню в металі дрібнозернистої феритно-перлітної або феритно-бейнітної структури. Внаслідок цього сталі не лише набувають високої міцності, а й мають хорошу пластичність та ударну в'язкість, як за додатних, так і за низьких температур.

Леговані конструкційні сталі та сфери їх застосування

До легованих високоміцних конструкційних сталей належать сталі класу міцності С590–С800. Такі сталі широко використовують у машинобудуванні при виготовленні особливо навантажених вузлів самоскидів великої вантажності, балок-рукоятей та ковшів потужних кар'єрних екскаваторів, поворотних платформ і стріл кранів та автобетононасосів.

На відміну від високоміцних низьколегованих конструкційних сталей, такі сталі додатково легують хромом, нікелем та молібденом. Завдяки цьому та внаслідок термічної обробки (гартування + високий відпуск) у металі легованих сталей формується бейнітна або бейнітно-мартенситна структура і вони набувають не лише високих показників міцності (границя плинності таких сталей перебуває в межах 590–800 МПа), а й добру здатність опиратися крихкому руйнуванню за низьких температур [2]. Головною негативною рисою таких сталей є те, що при їх зварюванні в з'єднаннях можуть утворюватися холодні тріщини [3]. Щоб уникнути цього, зазвичай для зварювання високоміцних легованих сталей використовують низьководневі зварювальні матеріали, а з'єднання перед зварюванням підігрівають до певної температури. Допустиму кількість водню в наплавленому металі та раціональну температуру попереднього підігріву зварних з'єднань встановлюють за результатами випробувань спеціальних зразків та технологічних проб [3].

Здатність високоміцних конструкційних сталей до зварювання

Згідно з ДСТУ 3761.1-98, «...металевий матеріал вважається зварюваним до встановленого ступеня, якщо за відповідної процедури зварювання досягається суцільність матеріалу, яка гарантує відповідність вимогам, що їх пред'являють до зварних з'єднань, як щодо їх властивостей, так і щодо їхнього впливу на конструкцію, складовою частиною якої вони є...».

Отже, зварність можна розглядати як властивість матеріалу утворювати нероз'ємні з'єднання, як у процесі його одержання, так і при подальшій експлуатації зварного виробу.

Оцінка здатності до зварювання високоміцних сталей зводиться до визначення оптимальних умов зварювання, за яких виключається можливість утворення в зварних з'єднаннях холодних тріщин, а в металі — зони термічного впливу (ЗТВ) структур, які сприятимуть забезпеченню на цій ділянці зварного з'єднання показників міцності, пластичності та ударної в'язкості на рівні вимог до зварних конструкцій.

На відміну від сталей, які набувають механічних властивостей як завдяки вибору певних систем легування, так і в результаті вибору спеціальних умов їх прокатки або термічної обробки, такий самий метал у зварних з'єднаннях повинен мати подібні властивості у стані після зварювання.

Оскільки умови нагрівання та охолодження металу при зварюванні істотно відрізняються від тих, що спостерігаються під час термічної обробки сталей, на першому етапі досліджень здатності сталей до зварювання вивчають їх реакцію на термічний цикл зварювання (ТЦЗ). При цьому встановлюють, як змінюється структура сталевого прокату в умовах безперервного охолодження по термічному циклу зварювання та як це позначається на механічних властивостях металу зони термічного впливу зварних з'єднань.

Дослідження щодо впливу термічних циклів зварювання на структуру металу ЗТВ зварних з'єднань високоміцних сталей дали змогу виявити, що на їх фазово-структурні перетворення впливає не лише хімічний склад сталей, а й умови охолодження металу, який нагрівався вище температури Ас3.

Спільним для низьколегованих високоміцних конструкційних сталей є те, що за малих швидкостей охолодження $W_{6/5}$ (швидкість охолодження в інтервалі температур 600–500 °С), що не перевищують 10 °С/с, перетворення аустеніту на ділянці перегріву металу ЗТВ відбувається переважно у феритній, перлітній та

бейнітній областях з формуванням крупнозернистої структури [4–6]. Така структура забезпечує металу хороші пластичні властивості та границю плинності майже на рівні основного металу. Натомість ударна в'язкість металу на ділянці перегріву ЗТВ буде значно нижчою за аналогічні показники основного металу. Зі збільшенням швидкості охолодження металу ЗТВ структурні складові в ньому подрібнюються, і це сприяє не лише зростанню його границі плинності, а й характеристик ударної в'язкості. Пластичні властивості такого металу дещо зменшуються, але залишаються в рамках вимог до зварних конструкцій.

При $W_{6/5} \geq 15$ °С/с на ділянці перегріву металу ЗТВ зварних з'єднань низьколегованих сталей починає утворюватися мартенсит. Зі збільшенням $W_{6/5}$ його частка в металі зростає і при $W_{6/5} \geq 100$ °С/с досягає 100%. Це сприяє суттєвому зміцненню металу, але його пластичні властивості та ударна в'язкість при цьому зменшуються, інколи істотно.

Впливають умови охолодження металу при зварюванні і на фазово-структурні перетворення, які відбуваються в металі ЗТВ зварних з'єднань високоміцних легованих сталей. Як і в низьколегованих сталях, зі збільшенням швидкості охолодження зварних з'єднань структура металу подрібнюється. Однак на відміну від низьколегованих сталей, навіть за відносно невеликих швидкостей охолодження ($W_{6/5} = 2-10$ °С/с) на ділянці перегріву металу ЗТВ легованих сталей утворюється змішана бейнітно-мартенситна структура, частка мартенситу в якій при $W_{6/5} = 10$ °С/с може досягати 50%, а при $W_{6/5} \geq 20$ °С/с — 100%.

Утворення таких структур, з одного боку, сприяє значному зміцненню металу, а з іншого — підвищує його схильність до утворення холодних тріщин. Адже, як відомо [3], метал, що містить понад 50% мартенситу, за наявності розтягувальних напружень та за певних концентрацій у ньому дифузійного водню має низьку здатність опиратися зародженню та розвитку зазначених тріщин. Зважаючи на це, на наступному етапі досліджень здатності високоміцних сталей до зварювання вивчають те,

як вони опираються утворенню холодних тріщин залежно від величини розтягувальних напружень, що діють на метал, та вмісту в ньому дифузійного водню. Зазвичай такі дослідження виконують з використанням технологічних проб, які мають певну або змінну жорсткість закріплення, або зразків, що імітують умови утворення холодних тріщин на певній ділянці зварного з'єднання (шов, зона термічного впливу).

Оскільки, як було зазначено вище, формування тієї чи іншої структури в металі ЗТВ високоміцних сталей залежить від того, який хімічний склад вони мають та з якою швидкістю охолоджується метал після нагрівання по характерному для дугового зварювання термічному циклу, то за структурний критерій оцінки схильності сталі до утворення холодних тріщин при зварюванні зазвичай беруть вуглецевий еквівалент сталі (C_e), який розраховується за наведеною нижче формулою, та $W_{6/5}$.

$$C_e = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15,$$

де C, Mn, Cr, Mo, V, Ni та Cu — масові частки (%) вуглецю, марганцю, хрому, молібдену, ванадію, нікелю та міді відповідно.

Зважаючи на те, що експериментально визначити концентрацію дифузійного водню в зоні утворення холодних тріщин неможливо, його вплив на цей процес вивчають, виходячи з того, яка кількість такого водню перебуває в наплавленому металі. Рівень залишкових напружень у технологічних пробах регулюється зміною жорсткості їх закріплення, а в зразках — зміною величини прикладеного зовні розтягувального навантаження.

Виконані у цьому напрямі дослідження дозволили встановити, що ймовірність утворення в зварних з'єднаннях високоміцних легованих сталей холодних тріщин зростає зі збільшенням вмісту дифузійного водню в наплавленому металі, швидкості охолодження зварних з'єднань і величини розтягувальних залишкових напружень [7, 8]. Встановлено умови, за яких ризик утворення холодних тріщин у зварних з'єднаннях зводиться до мінімуму.

Так, у разі обмеження $W_{6/5}$ до $10^\circ\text{C}/\text{c}$, а вмісту дифузійного водню в наплавленому металі до $4\text{ см}^3/100\text{ г}$, рівень напружень, який метал ЗТВ зварних з'єднань зі сталей з вуглецевим еквівалентом $C_e = 0,35\text{—}0,45\%$ може витримати без утворення холодних тріщин, становить 90% від його границі плинності. Зі зростанням C_e вимоги щодо допустимого рівня залишкових напружень у зварних з'єднаннях зростають. При $C_e = 0,45\text{—}0,55\%$ вони не повинні перевищувати 70%, а при $C_e = 0,60\text{—}0,70\%$ — 50% границі плинності металу ЗТВ.

Запобігти утворенню холодних тріщин у металі ЗТВ зварних з'єднань, що охолоджувалися зі швидкістю $W_{6/5}$ більшою, ніж $25^\circ\text{C}/\text{c}$, та за вмісту дифузійного водню в наплавленому металі на рівні $16\text{ см}^3/100\text{ г}$, можна за умов, коли рівень залишкових напружень у з'єднаннях сталей з $C_e 0,35\text{—}0,55\%$ не перевищує $0,4\sigma_{0,2}$, а сталей з C_e понад $0,70\%$ — $0,2\sigma_{0,2}$.

Щоб обмежити вміст дифузійного водню в наплавленому металі, зазвичай використовують низьководневі зварювальні матеріали та здійснюють спеціальну їх підготовку до зварювання — очищують від бруду та мастил, прожарюють у печах тощо. Для ефективного регулювання швидкості охолодження з'єднань перед зварюванням їх підігривають до певної температури, раціональну величину якої встановлюють за результатами зазначених вище досліджень. Щоб зменшити рівень залишкових напружень у зварних з'єднаннях, вибирають певну послідовність збирання і зварювання окремих елементів конструкції, а також обмежують погонну енергію зварювання при виконанні швів.

За результатами наведених вище досліджень та з урахуванням встановлених особливостей структуроутворення в металі ЗТВ нових мікролегованих конструкцій сталей класу міцності С355—С490 було розроблено низку технологій їх зварювання, які в останні роки було впроваджено на підприємствах України при виготовленні металевих конструкцій різноманітного призначення. Зокрема, металеві конструкції для покриття на НСК «Олімпійський» у м. Києві (рис. 1а) зроблено зі сталі



а



б



в

Рис. 1. Об'єкти, на яких впроваджено розроблені в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона технології зварювання нових мікролегованих конструкцій сталей класу міцності С355–С490: а – зварні металеві конструкції покриття над НСК «Олімпійський»; б – прогінні споруди Подільського мостового переходу в м. Києві; в – вагони платформ з подовженою рамою для залізничного перевезення 40-фунтових контейнерів

класу міцності С355, що виготовляється за EN 10025-2 (марка S355J2); прогінні споруди Подільського мостового переходу в м. Києві (рис. 1б) виготовлено зі сталі класу міцності С490 (марка 06Г2Б); для виготовлення вагонів платформ з подовженою рамою для залізничного перевезення 40-фунтових контейнерів (рис. 1в) уперше на теренах країн СНД використано сталь класу міцності С460 (марка 10Г2ФБ) [9].

Ремонтно-зварювальні технології та приклади їх використання

Ще один напрям робіт, який активно розвивається в Інституті, спрямований на вирішення важливої для нашої держави проблеми – подовження ресурсу безпечної експлуатації конструкцій тривалого терміну використання, які під час роботи зазнали пошкоджень і потребують ремонту.

Потреба в таких роботах пов'язана з тим, що на сьогодні в Україні експлуатується велика кількість інженерних споруд, машин і механізмів, базові вузли яких є зварними. Більшість з них (кар'єрні екскаватори, машини особливо великої вантажопідйомності, дробарки, пресове устаткування, шахтне обладнання, вугільні галереї, прогінні споруди мостових конструкцій тощо) виготовлено з високоміцних сталей з границею плинності 350–800 МПа ще за часів СРСР у 70–80-х роках минулого століття й експлуатується дотепер. На нові їх не замінюють навіть у тому випадку, коли в металі накопичилися пошкодження від втоми і утворилися тріщини. Оскільки тріщини утворюються в окремих найбільш навантажених елементах конструкції, економічно вигідніше їх відновлювати. Цим пояснюється загальна для всіх країн тенденція – пошук способів, які б дали змогу максимально подовжити термін безпечної експлуатації діючих об'єктів. Особливо гостро ця проблема стоїть при потребі в ремонті імпортованих конструкцій, а також конструкцій, виробництво яких припинено, а отже, немає можливості придбати для них нові вузли замість пошкоджених. Роль дугових процесів

зварювання у вирішенні цієї проблеми є надзвичайно великою.

Ремонтні технології не створюються одночасно з технологічними процесами з виготовлення металоконструкцій, найчастіше їх розробляють в «аварійному» режимі. При цьому передусім намагаються використовувати для ремонту промислові технології. Стосовно високоміцних сталей такими технологіями передбачено використання низьководневих зварювальних матеріалів, попереднього підігріву, а також заходів для зменшення напруженого стану зварних з'єднань. В умовах машинобудівних заводів напружений стан металоконструкцій можна регулювати завдяки визначеній послідовності зварювання окремих вузлів конструкції, термообробки, попереднього пружного деформування зварювальних елементів тощо. При ремонті великогабаритних металоконструкцій, демонтаж і монтаж яких ускладнений, більшість із зазначених технологічних операцій повною мірою реалізувати неможливо. З об'єктивних причин технологічний процес порушується, і тому не завжди можна досягти очікуваного результату — отримання якісних з'єднань з високою надійністю і довговічністю. Тріщини у відновлених вузлах, що мають велику жорсткість закріплення, а відповідно, й велику напруженість, можуть зароджуватися вже на стадії ремонту, у зв'язку з чим виникає потреба в повторенні процедури та пошуку технологій зварювання, які б дозволили підвищити технологічну міцність зварних з'єднань. Радикально вирішити цю проблему виявилось неможливо без створення спеціальних ремонтно-зварювальних технологій, що дозволяють зменшити рівень залишкових напружень у з'єднаннях, зварювання яких здійснюється за умов стиснутої деформації.

Для створення надійних ремонтно-зварювальних технологій потрібно глибоко вивчити напружено-деформований стан жорстко закріплених з'єднань, визначити ймовірність утворення в них холодних тріщин, відшукати технологічні шляхи регулювання залишкових напружень у зварних з'єднаннях, а також встановити вплив зварювання на довговічність і

опір відремонтованих з'єднань крихкому руйнуванню.

У результаті досліджень за цим напрямом було визначено, що зі зменшенням бази закріплення зварних з'єднань рівень залишкових напружень у них збільшується і може досягати границі плинності металу швів та основного металу, а також те, що поліпшити напружено-деформований стан з'єднань, зварювання яких виконується в умовах жорсткого закріплення, можна за допомогою оптимізації технологічного процесу зварювання. Зокрема, було встановлено, що зменшення погонної енергії зварювання втричі та виконання валиків у кожному із шарів шва з'єднань товщиною до 20 мм у певній послідовності дозволяє зменшити рівень залишкових напружень майже на 25% [10]. Ще істотніше, майже вдвічі, знизити рівень таких напружень у зварних з'єднаннях товщиною 40 мм і більше можна, застосувавши під час їх ремонту таку технологічну операцію, як проковування швів. При цьому електричним або пневматичним ударним інструментом із зусиллям не менше ніж 5 кг проковуються, за винятком кореневого і завершального, всі шари шва. Завдяки такому технологічному прийому підвищується стійкість зварних з'єднань до утворення холодних тріщин, що дозволяє зменшити температуру їх попереднього підігрівання на 50–80 °С і забезпечити при цьому їх високу технологічну міцність.

За результатами спеціальних досліджень, при виконанні яких було змодельовано умови навантаження зварних з'єднань при експлуатації конструкцій, у тому числі і з утворенням тріщин втоми, а також усі технологічні операції, що застосовуються під час ремонту пошкоджених з'єднань, було визначено, як ремонтно-зварювальні технології впливають на експлуатаційні властивості [11, 12].

Зокрема, за результатами випробувань зразків на втому було встановлено, що після перших двох якісно виконаних ремонтів довговічність зварних з'єднань можна збільшити майже втричі (тобто після кожного з цих ремонтів вона підвищується на 100% відносно довговічності з'єднань, що були зварені первинно). По-



а

Рис. 2. Об'єкти на яких у період з 2010 по 2015 р. було впроваджено ремонтно-зварювальні технології: а – установка каталітичного крекінгу нафти у м. Лисичанськ; б – залізничний міст через р. Ворскла у м. Полтава; в – автосамоскид фірми «Caterpillar» CAT 785С вантажністю 135 т

мітне зниження довговічності зварних з'єднань на 50 і 70% відбувається після 3-го і 4-го ремонтів відповідно. Зважаючи на це, можна зробити висновок, що четвертий ремонт в одному й тому самому місці без глобальної заміни металу з накопиченими втомними пошкодженнями є економічно недоцільним.

Що стосується показників статичної міцності відремонтованих зварних з'єднань та їх здатності опиратися крихкому руйнуванню, то незначне, на 5–10%, зменшення показників границі плинності металу та більш помітне, на 40–45%, зниження показників K_{1c} спостерігається лише в зоні термічного впливу в з'єднаннях із високоміцних легованих сталей після 4-го ремонту.



б



в

Результати наведених вище досліджень було взято за основу при розробленні ряду ремонтно-зварювальних технологій, які в останні роки було впроваджено під час ремонту унікальних інженерних споруд, таких як корпус регенератора реакторного блоку устаткування каталітичного крекінгу з переробки нафти у м. Лисичанськ (рис. 2а), прогінних споруд залізничного моста через р. Ворскла у м. Полтава (рис. 2б), рами автосамоскиду фірми «Caterpillar» CAT 785С вантажністю 135 т (рис. 2в), а також при ремонті базових вузлів подрібнювального устаткування і станин пресів великого зусилля, шахтного обладнання тощо [13, 14].

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Poznyakov V.D., Zhdanov S.L., Maksimenko A.A., Sineok A.G., Gerasimenko A.M. Weldability of sparsely-alloyed steels 06GDB and 06G2B. *The Paton Welding Journal*. 2013. (4): 8.
[Позняков В.Д., Жданов С.Л., Максименко А.А. и др. Свариваемость экономнолегированных сталей 06ГБД и 06Г2Б. *Автоматическая сварка*. 2013. № 4. С. 9–16].
2. Musiyachenko V.F. *Weldability and welding technology of high strength steels*. (Kyiv: Naukova Dumka, 1983).
[Мусяченко В.Ф. *Свариваемость и технология сварки высокопрочных сталей*. К.: Наук. думка, 1983].
3. Makarov E.L. *The cold cracks during welding of alloyed steels*. (Moscow: Mashinostroenie, 1981).
[Макаров Э.Л. *Холодные трещины при сварке легированных сталей*. М.: Машиностроение, 1981].
4. Zhdanov S.L., Poznyakov V.D., Maksimenko A.A., Dovzhenko V.A., Vasiliev V.G., Vysokolyan N.V., Korobka V.A. Structure and properties of arc-welded joints on steel 10G2FB. *The Paton Welding Journal*. 2010. (11): 8.
[Жданов С.Л., Позняков В.Д., Максименко А.А. и др. Структура и свойства сварных соединений стали 10Г2ФБ, выполненных дуговой сваркой. *Автоматическая сварка*. 2010. № 11. С. 12–16].
5. Poznyakov V.D., Zhdanov S.L., Maksimenko A.A. The structure and properties of welded joints of steel S390 (S355 J2). *The Paton Welding Journal*. 2012. (8): 6.
[Позняков В.Д., Жданов С.Л., Максименко А.А. Структура и свойства сварных соединений стали С390 (S355 J2). *Автоматическая сварка*. 2012. № 8. С. 7–11].
6. Poznyakov V.D. Structural steels of strength class S350...S490 and their weldability. *Construction, materials science, mechanical engineering*. Coll. Sci. Proc. 2016. (89): 144.
[Позняков В.Д. Конструкційні сталі класу міцності С350...С490 та їх здатність до зварювання. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Сб. науч. трудов. 2016. № 89. С. 144–155].
7. Lobanov L.M., Poznyakov V.D., Makhnenko O.V. The formation of cold cracks in welded joints of high strength steels with yield strength of 350...850 MPa. *The Paton Welding Journal*. 2013. (7): 7.
[Лобанов Л.М., Позняков В.Д., Махненко О.В. Образование холодных трещин в сварных соединениях высокопрочных сталей с пределом текучести 350...850 МПа. *Автоматическая сварка*. 2013. № 7. С. 8–13].
8. Poznyakov V.D. The resistance of welded joints of high-strength structural steel to cold cracking. *Construction, materials science, mechanical engineering*. Coll. Sci. Proc. 2014. (73): 29.
[Позняков В.Д. Сопrotивляемость сварных соединений высокопрочных конструкционных сталей образованию холодных трещин. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Сб. науч. трудов. 2014. № 73. С. 29–36].
9. Poznyakov V.D., Zhdanov S.L., Sineok A.G., Maksimenko A.A. Experience of application of S355 J2 steel in metal structures of the roofing over NSC «Olimpijsky» (Kiev). *The Paton Welding Journal*. 2011. (6): 45.
[Позняков В.Д., Жданов С.Л., Синеок А.Г., Максименко А.А. Опыт применения стали S355 J2 в металлоконструкциях перекрытия над НСК «Олимпийский» (г. Киев). *Автоматическая сварка*. 2011. № 6. С. 54–55].
10. Lobanov L., Poznyakov V., Pivtorak V., Mikhodui O., Orlovskiy V. Residual stresses in welded joints of high strength steels. *Materials Science*. 2009. 45(6): 768.
11. Poznyakov V.D., Dovzhenko V.A., Kasatkin S.B., Maksimenko A.A. Microstructural features of fatigue damageability and methods to improve the fatigue life of welded joints from 09G2S steel. *The Paton Welding Journal*. 2012. (5): 26.
[Позняков В.Д., Довженко В.А., Касаткин С.Б., Максименко А.А. Микроструктурные особенности усталостной повреждаемости и способы повышения долговечности сварных соединений стали 09Г2С. *Автоматическая сварка*. 2012. № 5. С. 32–37].
12. Poznyakov V.D., Maksimenko A.A. Changes in the structure and properties of HAZ metal of 10G2FB steel welded joints during welding and cyclic bending load. *Welding and diagnostics*. 2013. (4): 30.
[Позняков В.Д., Максименко А.А. Изменение структуры и свойств металла ЗТВ сварных соединений стали 10Г2ФБ при сварке и циклической нагрузке изгибом. *Сварка и диагностика*. 2013. № 4. С. 30–35].
13. Poznyakov V.D., Gayvoronskiy A.A., Demchenko Y.V., Panfilov A.I. Repair of the central cross support of a frame dump track CAT 785C. *Welder*. 2014. (1): 6.
[Позняков В.Д., Гайворонский А.А., Демченко Ю.В., Панфилов А.И. Ремонт центральной поперечной опоры рамы самосвала CAT 785C. *Сварщик*. 2014. № 1. С. 6–9].
14. Poznyakov V.D., Klaratyuk A.V., Maksimenko A.A., Gerasimenko A.M., Davydov E.A. Repair of shell regenerator R-202. *Welder*. 2016. (1): 16.
[Позняков В.Д., Кларатюк А.В., Максименко А.А. и др. Ремонт корпуса регенератора Р-202. *Сварщик*. 2016. № 1. С. 16–20].

V.D. Poznyakov

Paton Electric Welding Institute
of National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv)

WELDING TECHNOLOGY FOR PRODUCTION AND REPAIR
OF HIGH-STRENGTH STEEL METAL STRUCTURES

According to the materials of scientific report at the meeting
of the Presidium of NAS of Ukraine, November 23, 2016

The report describes the results of research on the effect of specific to arc welding thermal cycles on the structure, mechanical properties and resistance to fatigue and brittle fracture of welded joints of high-strength structural steels with yield stress of 350-800 MPa. The results of practical application of welding technologies, developed on the basis of such research, in manufacture or repair of vehicles, machinery and engineering structures of long life are presented.

Keywords: arc welding, metal structure, mechanical properties, cold crack, brittle fracture, fatigue resistance.