

**Л. Лобанов**

Академік НАН України,  
професор, д-р техн. наук

**В. Півторак**

Канд. фіз.-мат. наук

**В. Позняков**

Канд. техн. наук

**В. Савицький**

Канд. техн. наук

**О. Міходуї**

Канд. техн. наук

Інститут електрозварювання  
ім. Є. О. Патона НАН України,  
м. Київ

УДК 621.791:669.15-194+621.791.052:539.4.014.13

## **ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОГО ПІДІГРІВУ НА ФОРМУВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ ВИСОКОМІЦНОЇ СТАЛІ**

*Розглянуто вплив температури попереднього підігріву до 250 °С на формування залишкових напружень у зварних з'єднаннях високоміцної сталі, які виконані ручним електродуговим та механізованим зварюванням під флюсом на обмежених тепловкладеннях ( $Q_{св} \gg 10$  кДж/см). Вимірювання залишкових напружень виконувались методом спекл-інтерферометрії. Встановлено, що для забезпечення мінімального рівня залишкових напружень у зварних з'єднаннях бейнітно-мартенситних сталей температура підігріву не повинна перевищувати 70...130 °С та узгоджуватись з особливостями протікання теплових процесів при конкретних умовах зварювання.*

**високоміцна сталь, попередній підігрів, механізоване та ручне електродугове зварювання, термічний цикл, залишкове напруження**

Попередній підігрів ( $T_{п}$ ) — технологічна операція, яка практично завжди використовується при виготовленні зварних конструкцій з високоміцних бейнітно-мартенситних сталей з межею текучості понад 600 МПа. У залежності від конкретних умов його величина може змінюватися в діапазоні температур  $T_{п}=60...250$  °С [1 — 3 та ін.]. Позитивний вплив попереднього підігріву на технологічну міцність зварних з'єднань часто пов'язують з уповільненням швидкостей охолодження металу зони термічного впливу (ЗТВ) і формуванням за рахунок цього структур, що відрізняються підвищеною стійкістю до утворення холодних тріщин або зі зниженням пікових концентрацій дифузійного водню у швах і ЗТВ. Є також публікації, в яких наголошується, що попередній підігрів може впливати і на формування залишкових напружень у зварних з'єднаннях, проте наведені в них відомості носять суперечливий характер [4, 5]. Значною мірою це, мабуть,

обумовлено тим, що, як об'єкт досліджень, найчастіше використовувались такі конструкційні сталі, які істотно відрізнялись між собою за хімічним складом, а умови зварювання з'єднань і проведення експериментів були непорівнянними.

Метою цієї праці була оцінка впливу попереднього підігріву на особливості утворення залишкових напружень у зварних з'єднаннях високоміцних сталей.

Об'єктом досліджень були зварні з'єднання з одношаровим наплавленням. Для їх виготовлення використовувались пластини розміром 350×250×30 мм з високоміцної сталі марки 14ХГ2САФД ( $\sigma_{0,2} \geq 590$  МПа,  $\sigma_{в} \geq 690$  МПа,  $\delta \geq 14$  %, КСУ > 39 Дж/см<sup>2</sup> при -40 °С) такого хімічного складу, %: С 0,12; Мн 1,12; Si 0,58; Cr 0,44; Cu 0,39; V 0,08; [N] 0,02; S 0,020; P 0,020. Вздовж поздовжньої осі пластин виконувалися канавки радіусом 3 мм, які з використанням ручного дугового і механізованого зварювання під

Хімічний склад та властивості металу швів з бейнітно-мартенситною структурою

Зварювальні матеріали	Масова частка елементів, %						$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\delta_5$	$\psi$	KCV, Дж/см <sup>2</sup> при $t_{исп}$ , °C		
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	МПа	%		-20	-40	-60	
Дріт Св-07ХНЗГМФТЮ, флюс АН-43	0,07	0,98	0,35	0,62	2,1	0,32	680	796	19,3	59,9	$\frac{80-87}{84}$	$\frac{35-44}{39}$	$\frac{30-38}{33}$
Електроли АНП - 2	0,8	1,20	0,25	0,73	1,63	0,42	650	770	21,3	62,0	$\frac{84-96}{88}$	$\frac{30-41}{35}$	$\frac{20-25}{23}$

флюсом наплавлялись на рівні з основним металом. Такий підхід давав змогу моделювати умови виконання завершальних проходів швів великого перерізу і при цьому виключити вплив на цей процес випадкових чинників. Зварювання зразків здійснювали на характерних для високоміцних сталей обмежених режимах, таких, що забезпечують погонну енергію зварювання ( $Q_{зв}$ )  $\approx 10,0$  кДж/см. При механізованому зварюванні, яке виконувалось на постійному струмі зворотної полярності зварювальним дрогом Св-07ХНЗГМФТЮ діаметром 2,0 мм під флюсом АН-43, це досягалось при:  $I_{зв}=300-310$  А,  $U_{д}=30$  В,  $V_{зв}=30$  м/ч. Щоб забезпечити вказану величину  $Q_{зв}$ , ручне дугове зварювання виконували електродами діаметром 4,0 мм (використовувалися електроди марки АНП-2) на таких режимах:  $I_{зв}=220$  А,  $U_{д}=30$  В,  $V_{зв}=18$  м/ч. У табл. 1 наведені хімічний склад металу швів і типові механічні властивості досліджених з'єднань.

Температура попереднього підігріву зразків змінювалась від 70 до 250 °C. Для підігрівання використовувалися стандартні газові пальники. За їхньою допомогою по обидві сторони канавки на віддалі 40...60 мм від осі наплавлення підігрівали метал до вибраної температури (нагрівали ділянки шириною 60...80 мм). При цій температурі зразки витримувалися 15 — 20 хв, після чого починалася процедура зварювання.

Як відомо, на характер формування полів залишкових напружень у зварних з'єднаннях вуглецевих сталей істотний вплив мають особливості проходження термічного циклу зварювання. У разі виконання зварних з'єднань з легованих високоміцних сталей характер утворення залишкових напружень складніший.

На додаток до зазначеного чинника на цей процес істотно впливають фазово-структурні перетворення, що відбуваються в металі на стадії охолодження зварних з'єднань, які, у свою чергу, також істотно залежать від умов охолодження зварних з'єднань [7]. Тому на початковому етапі досліджень нами, стосовно вибраних умов виконання однопрохідних наплавлень, були проаналізовані особливості охолодження зварних з'єднань.

Зміну в часі температури у зварних з'єднаннях аналізували за результатами експериментальних досліджень. Запис термічних циклів зварювання здійснювали на осцилографі Н-117/1. Вимірювання температури виконували в поперечному щодо шва перерізі за допомогою хромель-алюмельових термопар діаметром 0,5 мм, які встановлювали в дослідних зразках так, щоб була можливість фіксувати умови охолодження ділянки перегріву металу ЗТВ, нагрітого до температури 1300...1350 °C.

Аналіз отриманих даних свідчить, що за таких умов проведення експериментів попередній підігрів має різний вплив на характер охолодження металу ЗТВ зварних з'єднань у високо- і низькотемпературних областях. При автоматичному зварюванні під флюсом без використання попереднього підігріву метал ЗТВ протягом тривалішого часу знаходиться при температурах, що перевищують 800 °C ( $\tau''$ , с) порівняно з ручною електродугою (див. рис. 1). Попередній підігрів практично не впливає на час перебування зварних з'єднань вище точки  $A_{с3}$  при ручному дуговому зварюванні, і приблизно на 30 % сприяє збільшенню цього часового інтервалу при автоматичному зварюванні під флюсом, якщо його величина дорівнює 250 °C.

Помітніше попередній підігрів впливає на перебування зварних з'єднань в інтервалах температур 600 — 500 °C, при яких у металі ЗТВ високоміцних сталей починаються фазові перетворення, і 800 — 100 °C — температурний інтервал ( $\tau_{81}$ ), в якому відбувається активна дифузія водню [7]. Підвищення температури попереднього підігріву від 70 до 250 °C дає можливість у 2,5...8 разів збільшити тривалість часу перебування металу при температурах, що перевищують 800 — 100 °C, і в 1,8...3,5 рази уповільнити швидкість охолодження металу в інтервалі температур 600 — 500 °C ( $W_{65}$ ) і миттєву швидкість охолодження при температурі 300 °C ( $W_{300}$ ). Така зміна параметрів охолодження металу ЗТВ не тільки сприяє інтенсивнішій дифузії водню зі зварних з'єднань і формуванню в них сприятливіших з погляду підвищення опірності уповільненому й крихкому руйнуванню мікроструктур, але й впливає на протікання в них термомодеформаційних процесів.

Визначення залишкових напружень у зразках з одношаровим наплавленням виконувалось за допомогою методу електронної спекл-інтерферометрії і ненаскрізних отворів [8, 10]. Вибір методу для визначення залишкових напружень обумовлений тим, що він дає можливість оцінювати напруження в локальних ділянках зварного з'єднання (діаметр та глибина отворів 1 — 2 мм). Свердління ненаскрізного отвору порібно для релаксації залишкових напружень. Зазвичай деформації, які виникають на поверхні, що оточує вилучений об'єм металу, вимірюються за допомогою розетки тензорезисторів, яка наклеюється поблизу меж отвору. Метод свердління отвору у поєднанні з приклеєними тензорезисторами використовується протягом багатьох років. Проте він має недоліки, що ускладнюють його застосування при дослідженні конструкцій. Пов'язані вони з тим, що отвір потрібно свердлити на однаковій віддалі від трьох давачів розетки, оскільки навіть невелика похибка в їх розташуванні відносно

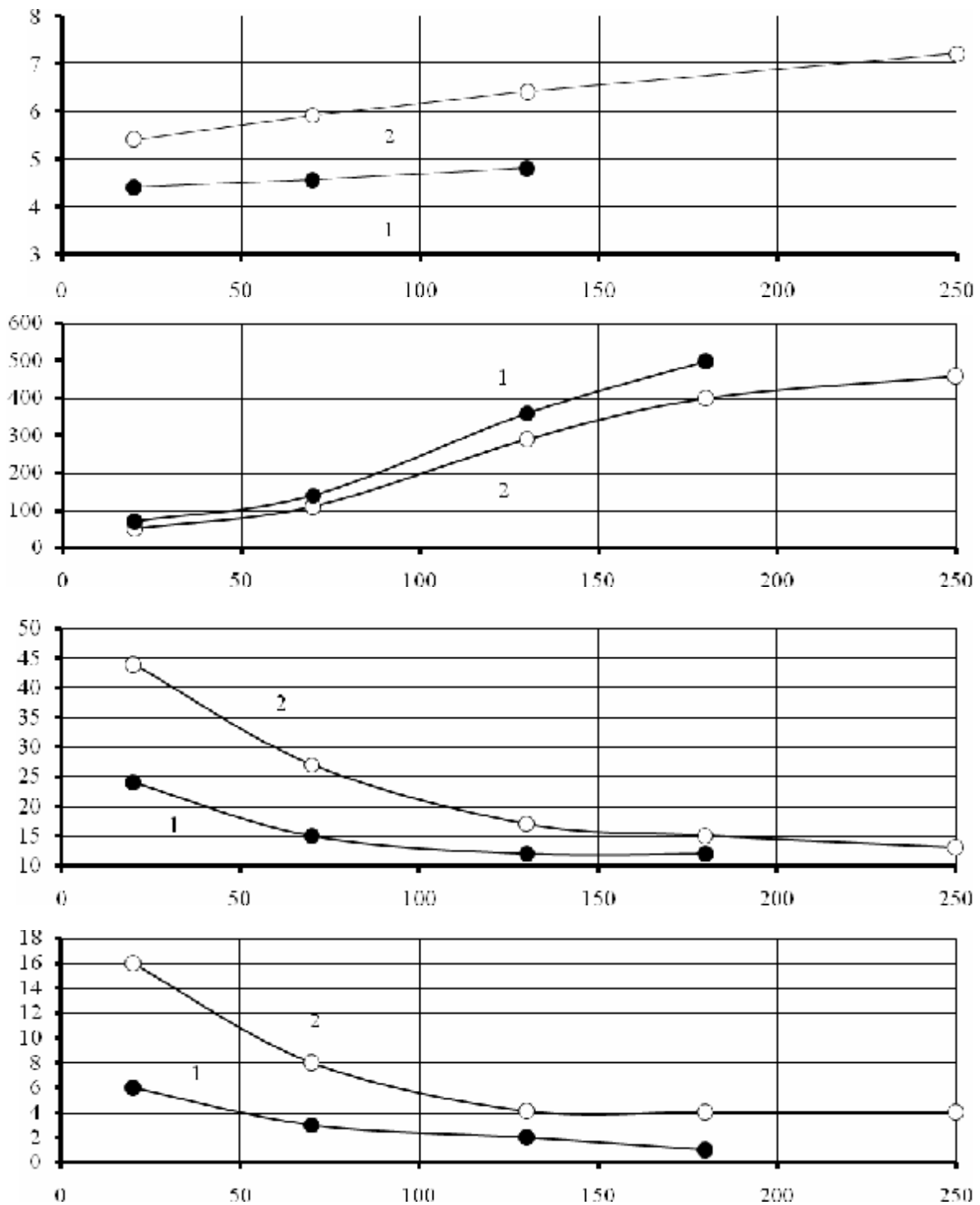


Рис. 1. Вплив попереднього підігріву на параметри охолодження металу ЗТВ одношарових наплавлень, які виконані ручним електродуговим (1) та автоматизованим зварюванням під флюсом (2)

центра висвердленого отвору може призвести до істотних похибок вимірювання. Деформації, що виникають при свердлінні отворів внаслідок розвантаження напружень, швидко зменшуються зі збільшенням віддалі від кромки отвору. В існуючих розетках тензодавачі розташовані на такій віддалі, на якій вони відчують лише відносно малу частку максимальних створених деформацій, що знижує чутливість методу. Крім цього, кожен тензодавач дає

результати, які є середніми на охопленій ним площі, що є ще одним джерелом похибки, якщо належно не врахувати це явище [9]. Іноді відбуваються відмови одного або декількох датчиків у розетці, що вимагає заміни тензодавачів і їх повторного встановлення. При цьому потрібна також наявність доброї адгезії між розеткою тензодавачів і поверхнею, але виконання цієї вимоги не може бути гарантоване. Загальновідомі типи розеток вимагають також

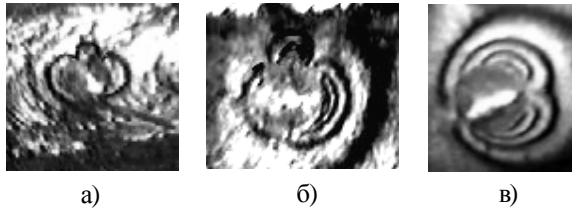


Рис. 2. Типові інтерферографи, які характеризують напруження в зварних з'єднаннях високоміцної сталі: а — метал шва, б — зона термічного впливу, в — основний метал

приблизно  $6,5 \text{ см}^2$  площі поверхні для проведення вимірювань у заданій точці. Крім цього, ця точка повинна бути доступною для установки точних шаблонів при їх приклеюванні. Час, потрібний для встановлення розетки, оцінювання якості встановлення й ін. може виявитися досить великим.

Вказані недоліки при вимірюванні деформацій з використанням розетки тензорезисторів і методу отворів відсутні при використанні методу електронної спекл-інтерферометрії. Метод електронної спекл-інтерферометрії не є чутливим до точного розміщення отвору на поверхні об'єкта і його розмірів. Отвір може виконуватись практично в будь-якій точці ділянки, яка освітлюється лазерним випромінюванням, це не впливає на точність вимірювань. Тому при проведенні експериментів з визначення залишкових напружень свердління ненаскрізних отворів може виконуватися звичайним пристроєм.

Вимірювання залишкових напружень з використанням методу електронної спекл-інтерферометрії виконувалось відповідно до методики, описаної в публікаціях [8, 10]. Інтерференційні смуги, що в результаті виникли навколо отвору, мають різну частоту, яка визначається величиною залишкових напружень (рис. 2).

При визначенні залишкових напружень у дослідних зразках свердлили ненаскрізні отвори. Параметри висвердлених отворів вибиралися так, щоб досягти більшої локальності вимірів (рис. 3). При цьому для того, щоб уникнути впливу висвердлених поряд отворів один на одного, місця свердління отворів вибиралися так, щоб віддала  $r_0$  між сусідніми точками задовольняла умову  $r_0 \geq 4r_s$ , де  $r_s$  — радіус висвердленого отвору. Інтерференційна картина смуг навколо висвердленого отвору містить інформацію про величину залишкових напружень. Аналіз картин смуг дає змогу отримати значення залишкових напружень у досліджених точках [8, 10].

Розподіл залишкових напружень у поперечному перерізі пластини в центральній частині одношарових наплавов, виконаних ручним дуговим і механізованим зварюванням під флюсом, наведені на рис. 4 і рис. 5. Напруження на цих рисунках показані тільки для середньої частини пластин у поперечному перерізі зразка, де відбуваються найактивніші, з погляду формування поля залишкових напружень, процеси. Решта частини епюр напружень в основному металі не досліджувалась, і тому вони не зрівноважені по поперечному перерізу.

При зварюванні без попереднього підігрівання в металі шва і ЗТВ, виконаних ручним і механізованим процесами зварювання, в поперечному напрямі сформувались

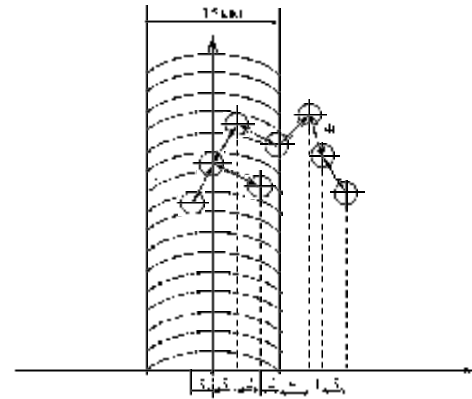
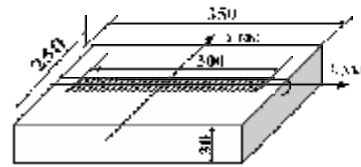


Рис. 3. Схема заміру залишкових напружень у зварних з'єднаннях високоміцної сталі 14ХГ2САФД

залишкові напруження розтягу  $\sigma_y$ . У досліджених перерізах у зоні шва їхні величини приблизно однакові:  $\sigma_y = 145 \dots 170 \text{ МПа}$ . У металі ЗТВ при ручному електродуговому зварюванні вони набагато вищі, ніж при автоматичному зварюванні під флюсом: відповідно  $\sigma_y' = 240 \text{ МПа}$  і  $\sigma_y'' = 150 \text{ МПа}$ . Така різниця у величинах напружень обумовлена відмінностями в швидкостях охолодження нижче  $A_{C3}$ , а, отже, й ступенем впливу на процес їхнього формування структурних перетворень [7].

Результати проведених досліджень свідчать про неоднозначний вплив попереднього підігріву на формування залишкових напружень у зварних з'єднаннях високоміцних сталей. Ефективність такого технологічного прийому залежить від поєднання багатьох чинників: температури підігріву і витримки при цій температурі, ширини зони нагріву, умов охолодження зварного з'єднання, товщини металу, а також від поєднання параметрів режиму зварювання.

Було встановлено (рис. 4), що попереднє підігрівання сприяє підвищенню напружень розтягу  $\sigma_y$  в металі швів. Так, при автоматичному зварюванні під флюсом з підігрівом  $70 \dots 250 \text{ }^\circ\text{C}$  напруження розтягу в швах підвищувались на  $20 \dots 70 \%$ . Аналогічна закономірність спостерігалась і при ручному електродуговому зварюванні.

У ЗТВ зварних з'єднань високоміцної сталі, які виконані ручним електродуговим зварюванням, попередній підігрів з'єднань до  $130 \text{ }^\circ\text{C}$  сприяв незначному підвищенню напружень (на  $11 \dots 18 \%$ ). При автоматичному зварюванні під флюсом попередній підігрів більшою мірою підвищує напруження розтягу в металі ЗТВ: відповідно на  $60$  і  $120 \%$  при підігріванні до  $130 \text{ }^\circ\text{C}$  і  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Найприйнятнішим для зварювання високоміцних сталей є попереднє підігрівання, яке сприяє уповільненню охолодження металу ЗТВ в його пружній області. Для дослідної сталі — це температури нижче  $780 \text{ }^\circ\text{C}$ . Виходячи

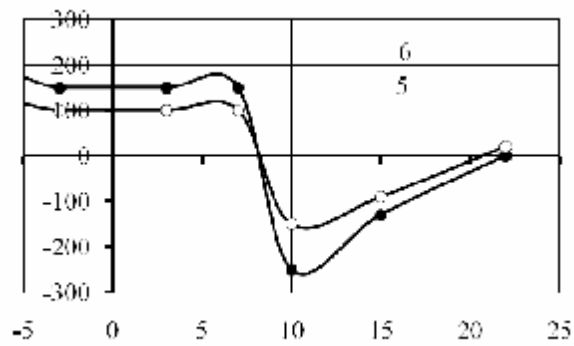
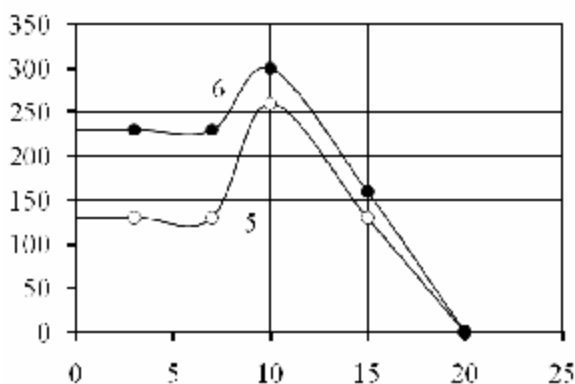
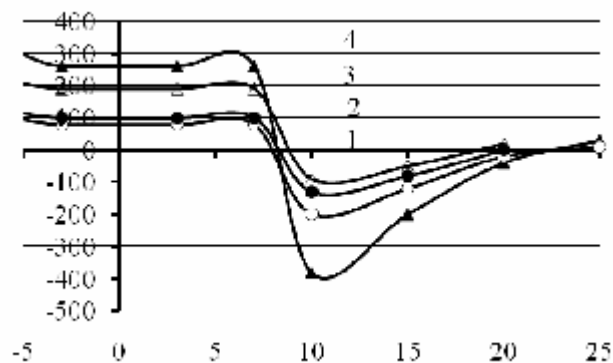
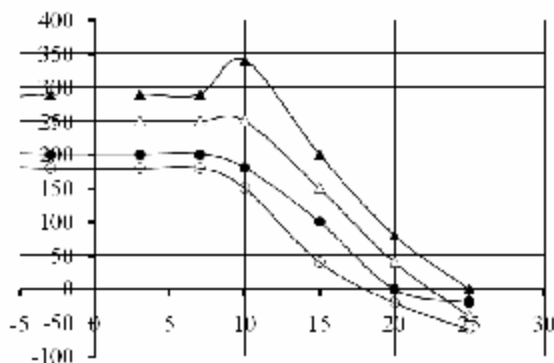
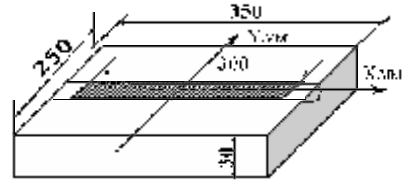
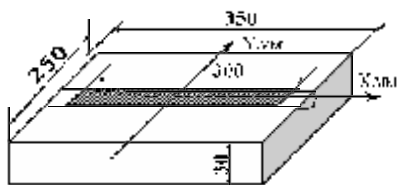


Рис. 4. Зміна напружень  $s_y$  у центральній частині одношарових наплавлень, які виконані механізованим зварюванням під флюсом (а) та ручним електродуговим (б) з використанням попереднього підігріву: 1,5 — 20 °С; 2 — 70 °С; 3, 6 — 130 °С; 4 — 250 °С

Рис. 5. Зміна напружень  $s_x$  у центральній частині одношарових наплавлень, які виконані механізованим зварюванням під флюсом (а) та ручним електродуговим (б) з використанням попереднього підігріву: 1,5 — 20 °С; 2 — 70 °С; 3, 6 — 130 °С; 4 — 250 °С

з такої точки зору, параметри охолодження металу ЗТВ з'єднань ( $\tau_{8/1}$ ,  $W_{6/5}$ ,  $W_{300}$ ), зварювання яких здійснювалось ручним дуговим способом з використанням електродів діаметром 4 мм, більш прийнятні порівняно з автоматичним зварюванням під флюсом. У цьому випадку всі ділянки зварних з'єднань у діапазоні підвищених температур охолоджуються інтенсивніше. Це сприяє зниженню рівня залишкових напружень.

Сприяє попереднє підігрівання підвищенню рівня напружень розтягу в наплавленому металі і в поздовжньому щодо осі шва напрямі (рис. 5). При температурі підігріву 250 °С таке підвищення залишкових напружень у швах, виконаних автоматичним зварюванням під флюсом, може становити 160 % і досягати рівня  $(0,45 \dots 0,5)\sigma_{0,2}$  основного металу. Меншою мірою попереднє підігрівання впливає на поздовжні залишкові напруження в зварних з'єднаннях, виконаних ручним дуговим зварюванням. Його збільшення до 130 °С сприяє підвищенню показників  $\sigma_y$ , порівняно зі зварюванням без підігріву, приблизно на 30 %, тоді як при механізованому зварюванні під флюсом вони збільшуються практично на 110 %.

Отже, проведені дослідження показують, що, для отримання з'єднань з низьким рівнем залишкових напружень потрібно обирати такі умови зварювання, за яких забезпечується їхнє інтенсивне охолодження в інтервалі температур, які є вищими за 780 °С, а температуру підігріву обмежити до 130...150 °С.

### Література

1. Uwer D., Dibelmeier H. Erfahrungen mit dem Verarbeiten des hochfesten wasservergüteten baustahls St.E.890 // Schweiss. Und Schneid. — 1986. — №9. — P. 430 — 436.
2. Zech F. Gittermastkran mit 950t Hublast bei 43 m Ausladung - geschweisst naturlich // Practiker. — 1989. — №10. — P. 626—634.
3. Мусияченко В.Ф., Миходуй Л.И. Дуговая сварка высокопрочных легированных сталей. — М.: Машиностроение. — 1987. — 80 с.
4. Козлов А.В., Фастовский В.М. К оценке теплового режима стыкового соединения, свариваемого с местным

подогревом // Вопросы судостроения, Серия Сварка. — 1981. — Вып. 31. — С. 30—34.

5. Талытов Г.Б. Сварочные деформации им напряжения. — Л.: Машиностроение, 1973. — 280 с.

6. Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. — М.: Машиностроение, 1984. — 280 с.

7. Особенности протекания термомеханических процессов при дуговой сварке высокопрочных сталей / Л.М. Лобанов, Л.И. Миходуй, В.Г. Васильев и др. // Автомат. сварка. — 1999. — №3. — С. 3—11.

8. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савицкий В.В., Ткачук Г.И. Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии // Автоматическая сварка. — 2006. — №1. — С. 25—30.

9. Kabiri M. Measurement of Residual Stresses by the Hole - Drilling Method: Influences of Transverse Sensitivity of the Gages and Relieved - Strain Coefficients // Experimental Mechanics, 24(3), 252—256, Sept. 1984.

10. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савицкий В.В., Ткачук Г.И. Оперативное определение остаточных напряжений с использованием электронной спекл-интерферометрии // В мире неразрушающего контроля. — 2006. — №2(27). — С. 10—13.

Отримана 20.10.08

L. Lobanov, V. Pivtorak, V. Poznyakov, V. Savitsky, O. Mikhoduy  
**Effect of preheating on formation of residual stresses in high-strength steel welded joints**

*Paton Institute of Welding, Kyiv*

*The effect of preheating temperature of up to 250 °C on the formation of residual stresses in high-strength steel welded joints, made by manual electric arc and mechanized submerged arc welding at limited heat inputs ( $Q_w \gg 10$  kJ/cm), is considered. Measurements of residual stresses were performed using the speckle-interferometry method. It was established that to provide the minimum level of residual stresses in welded joints of bainite-martensite steels, the preheating temperature should not exceed 70 – 130 °C and should be coordinated with specifics of proceeding thermal processes under definite welding conditions.*

21<sup>o</sup>01<sup>o</sup>01<sup>o</sup> àö3<sup>y</sup>

## 7th EUROPEAN SOLID MECHANICS CONFERENCE, ESMC7

7 September 2009 — 11 September 2009  
Instituto Superior Tecnico, Lisbon, Portugal

### Conference Topics

#### Continuum Mechanics

General theories; Elasticity; Plasticity; Homogenization & localization; Geomechanics; Micromechanics; Multiscale problems; Multifield problems; Contact mechanics

#### Material Mechanics

Damage and fracture; Fatigue; Viscoelastic materials; Composite materials; Smart materials; Material modelling; Biomaterials

#### Structural Mechanics

Beam structures; Plates & shells; Stability; Structural impact; Composite structures; Reliability and safety; Forming processes; Casting processes; Inverse problems; Biostructures

#### Dynamics

Noise and vibrations; Nonlinear dynamics; Kinematics; Multibody dynamics; Control of structures & mechanisms; Biomechanics of motion

#### Experimental Mechanics

Hybrid techniques; Experimental analysis; Non-destructive control; techniques; Noise and vibration; Instrumentation

#### Computational Mechanics

Finite elements; Boundary elements; Stochastic methods; Meshless methods; Optimization; High performance computing

#### Coupled Problems

Fluid-structures interaction; Thermomechanics; Aeroelastic problems; Earthquake & wind engineering; Magnetomechanical problems; Electromechanical problems

### Contact

*Chairperson:* Prof. Jorge Ambrosio

*Conference Secretariat:*

Mrs. Paula Jorge

IDMEC Instituto Superior Técnico

Av. Rovisco Pais 1

1049-001 Lisboa Portugal

Tel: +351 218419044 Fax: +351 218417915

e-mail: [esmc2009@dem.ist.utl.pt](mailto:esmc2009@dem.ist.utl.pt)